This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

Über dieses Buch

Dies ist ein digitales Exemplar eines Buches, das seit Generationen in den Regalen der Bibliotheken aufbewahrt wurde, bevor es von Google im Rahmen eines Projekts, mit dem die Bücher dieser Welt online verfügbar gemacht werden sollen, sorgfältig gescannt wurde.

Das Buch hat das Urheberrecht überdauert und kann nun öffentlich zugänglich gemacht werden. Ein öffentlich zugängliches Buch ist ein Buch, das niemals Urheberrechten unterlag oder bei dem die Schutzfrist des Urheberrechts abgelaufen ist. Ob ein Buch öffentlich zugänglich ist, kann von Land zu Land unterschiedlich sein. Öffentlich zugängliche Bücher sind unser Tor zur Vergangenheit und stellen ein geschichtliches, kulturelles und wissenschaftliches Vermögen dar, das häufig nur schwierig zu entdecken ist.

Gebrauchsspuren, Anmerkungen und andere Randbemerkungen, die im Originalband enthalten sind, finden sich auch in dieser Datei – eine Erinnerung an die lange Reise, die das Buch vom Verleger zu einer Bibliothek und weiter zu Ihnen hinter sich gebracht hat.

Nutzungsrichtlinien

Google ist stolz, mit Bibliotheken in partnerschaftlicher Zusammenarbeit öffentlich zugängliches Material zu digitalisieren und einer breiten Masse zugänglich zu machen. Öffentlich zugängliche Bücher gehören der Öffentlichkeit, und wir sind nur ihre Hüter. Nichtsdestotrotz ist diese Arbeit kostspielig. Um diese Ressource weiterhin zur Verfügung stellen zu können, haben wir Schritte unternommen, um den Missbrauch durch kommerzielle Parteien zu verhindern. Dazu gehören technische Einschränkungen für automatisierte Abfragen.

Wir bitten Sie um Einhaltung folgender Richtlinien:

+ *Nutzung der Dateien zu nichtkommerziellen Zwecken* Wir haben Google Buchsuche für Endanwender konzipiert und möchten, dass Sie diese Dateien nur für persönliche, nichtkommerzielle Zwecke verwenden.

+ *Keine automatisierten Abfragen* Senden Sie keine automatisierten Abfragen irgendwelcher Art an das Google-System. Wenn Sie Recherchen über maschinelle Übersetzung, optische Zeichenerkennung oder andere Bereiche durchführen, in denen der Zugang zu Text in großen Mengen nützlich ist, wenden Sie sich bitte an uns. Wir fördern die Nutzung des öffentlich zugänglichen Materials für diese Zwecke und können Ihnen unter Umständen helfen.

+ *Beibehaltung von Google-Markenelementen* Das "Wasserzeichen" von Google, das Sie in jeder Datei finden, ist wichtig zur Information über dieses Projekt und hilft den Anwendern weiteres Material über Google Buchsuche zu finden. Bitte entfernen Sie das Wasserzeichen nicht.

+ *Bewegen Sie sich innerhalb der Legalität* Unabhängig von Ihrem Verwendungszweck müssen Sie sich Ihrer Verantwortung bewusst sein, sicherzustellen, dass Ihre Nutzung legal ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass ein Buch, das nach unserem Dafürhalten für Nutzer in den USA öffentlich zugänglich ist, auch für Nutzer in anderen Ländern öffentlich zugänglich ist. Ob ein Buch noch dem Urheberrecht unterliegt, ist von Land zu Land verschieden. Wir können keine Beratung leisten, ob eine bestimmte Nutzung eines bestimmten Buches gesetzlich zulässig ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass das Erscheinen eines Buchs in Google Buchsuche bedeutet, dass es in jeder Form und überall auf der Welt verwendet werden kann. Eine Urheberrechtsverletzung kann schwerwiegende Folgen haben.

Über Google Buchsuche

Das Ziel von Google besteht darin, die weltweiten Informationen zu organisieren und allgemein nutzbar und zugänglich zu machen. Google Buchsuche hilft Lesern dabei, die Bücher dieser Welt zu entdecken, und unterstützt Autoren und Verleger dabei, neue Zielgruppen zu erreichen. Den gesamten Buchtext können Sie im Internet unter `http://books.google.com` durchsuchen.

UC-NRLF
$B 24 084
QC
757
E5
YC 10782

LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY OF CALIFORNIA.
GIFT OF
Hall Mrs.
Class

JUN 14 1904

WAS BLEIBT IN EINEM PERMANENTEN MAGNETEN PERMANENT?

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR ERLANGUNG

DER PHILOSOPHISCHEN DOCTORWÜRDE

DER

HOHEN PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT

DER

VEREINIGTEN FRIEDRICHS-UNIVERSITÄT
HALLE-WITTENBERG

VORGELEGT VON

HERMANN EICHEL
AUS STETTIN.

LIBRARY OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA

Halle a. S.
Hofbuchdruckerei von C. A. Kaemmerer & Co.
1903.

QC757
E5

Termin der mündlichen Prüfung: 4. August 1903.

Meinem Onkel Kast

gewidmet.

LIBRARY OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA

Einleitung.

Mit einem permanenten Magneten kann man verschiedene Operationen vornehmen, nach deren Beendigung die magnetischen Verhältnisse wieder dieselben sind wie zu Anfang. Reisst man z. B. den Anker eines Hufeisenmagneten ab, so tritt eine Veränderung des magnetischen Zustandes auf. Diese wird jedoch sofort wieder aufgehoben, wenn der Anker vorgelegt wird.

Was bleibt während derartiger Operationen konstant bei einem permanenten Magneten?

Diese Frage der Beantwortung zu unterziehen, wurde ich um so mehr veranlasst, als ein Aufsatz des Herrn J. Busch,[1]) betitelt: „Zur Theorie permanenter Magnete", eine diesbezügliche Auffassung kundtut, die man a priori nicht erwartet. Die betreffende Stelle lautet:

> „Aus allen Versuchen, die man mit permanenten Magneten machen kann, ergiebt sich, dass ein beliebiger permanenter Magnet nicht als der Sitz einer gewissen Anzahl von Kraftlinien, sondern vielmehr als der Sitz einer magnetomotorischen Kraft angesehen werden muss. Diese magnetomotorische Kraft ist aber gleich oder wenig kleiner als das Produkt aus der Koercitivkraft und der Länge des Magneten, voraus-

1) Elektrotechnische Zeitschrift 11, S. 234. 1901.

gesetzt, dass derselbe vorher bis zur praktischen Sättigung magnetisiert wurde.“

Da aber der Verfasser keine Versuche dieser Art, wodurch obiges Resultat begründet wird, anführt, so unternahm ich es, auf gütige Anregung von Herrn Professor E. Dorn, dem ich auch den Hinweis auf oben citierte Arbeit verdanke, die Frage nach der Konstanz bei einem permanenten Magneten durch eigene Untersuchungen zu entscheiden.

LIBRARY OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA

Abschnitt 1.

Ziel.

Die in der genannten Arbeit ausgesprochene Ansicht behauptet für einen permanenten Magneten: die Konstanz einer magnetomotorischen Kraft unter Verneinung der Konstanz für die Kraftlinienanzahl. Betrachten wir von diesem Standpunkte aus, welcher allerdings, wie gleich erwähnt, demjenigen meiner Auffassung nicht entspricht, einen beliebigen permanenten Magneten, so haben wir folgendes zu beachten.

Im Magneten herrscht eine magnetische Kraft, die mit der Koercitivintensität identisch ist. Ihre Grösse ist folglich von der Sorte des verwandten Materials abhängig und für ein und denselben Magneten konstant. Diese wirksame magnetisierende Intensität verursacht den remanenten Magnetismus, dessen numerischer Wert aber ausserdem von einer zweiten Grösse, dem „magnetischen Widerstande", beeinflusst wird. Denn zwischen magnetomotorischer Kraft, d. i. dem Linienintegral der inducierenden Intensität, dem Kraftlinienstrom und dem magnetischen Widerstande besteht die dem Ohm'schen Gesetze analoge Beziehung:

$$\text{Kraftlinienstrom} = \frac{\text{Magnetomotorische Kraft}}{\text{Magnetischer Widerstand}}$$

Solange also der magnetische Widerstand unverändert bleibt, behält der Kraftlinienstrom denselben Wert, ist mithin bei dieser Einschränkung auch konstant. Unterwirft man jedoch den vom Magneten und seiner Umgebung gebildeten mag-

netischen Kreis einer Änderung in seiner Zusammensetzung, so ist damit eine Variation seines magnetischen Widerstandes notwendig verbunden. Der Kraftlinienstrom giebt seinen solange innegehabten konstanten Wert auf und variiert in entgegengesetztem Sinne; vorausgesetzt ist jedoch, dass die Länge des permanenten Magneten nicht verändert wird, da nur unter dieser Annahme das Produkt aus Intensität und Länge des Magneten d. h. die magnetomotorische Kraft konstant bleibt. Ersetzt man nämlich die Luftschicht eines beliebigen permanenten Magneten, durch die die Kraftlinien überzutreten gezwungen sind, durch ein das Luftmedium ausfüllendes Stück Eisen oder Stahl, so verringert man den Widerstand um einen erheblichen Teil, weil die magnetische Leitfähigkeit dieser Körper diejenige der Luft weit überragt. Da andererseits die Längenausdehnung des Magneten keine Einbusse erlitten hat und somit die magnetomotorische Kraft nach wie vor ihren vorhandenen Wert zeigt, ergiebt sich aus dem angeführten Gesetze zwischen diesen drei Grössen eine Zunahme des Kraftlinienstromes. Jegliche Änderung des magnetischen Widerstandes verursacht für ein und denselben Magneten eine Variation in der Grösse seines Kraftlinienstromes, welche experimentell zu messen die Magnetinduktion eine sichere und bequeme Handhabe bietet. Liefern derartige Messungen tatsächlich ein Schwanken der Kraftlinienzahl, so wäre damit die Konstanz der Kraftlinienanzahl für einen permanenten Magneten illusorisch gemacht und andererseits die Annahme der Existenz einer konstanten magnetomotorischen Kraft ermöglicht.

Abschnitt 2.

Vorversuch mit einem Hufeisenmagneten.

Als Versuchsobjekt diente mir zunächst ein Hufeisenmagnet aus dem Inventar des Instituts, welcher, aus französi-

schem Stahl verfertigt, einen beträchtlichen Magnetismus besitzt. Über seine Mitte, d. i. die neutrale oder indifferente Stelle, wickelte ich einen umsponnenen Kupferdraht zu einigen Windungen zusammen, die sich so eng wie möglich an den Querschnitt des Magneten anlegten. Diese Spule bildete die Induktionsspule und war als solche mit einem ballistischen Galvanometer, Widerstandskasten und Erdinduktor verbunden. Als Anker wurde nicht der zugehörige aus derselben Stahlsorte geformte benutzt, sondern ein weiches Eisenstück, dessen Querschnitt grösser war als der des Magneten. Die magnetische Leitfähigkeit wurde dadurch in zwiefacher Weise gesteigert. Durch Vorlegen oder Abreissen dieses Ankers veränderte ich jedesmal den Widerstand des magnetischen Kreises. Die damit verbundene Änderung der Kraftlinienzahl, wie sie oben diskutierte Auffassung erfordert, muss in der Spule inducierte elektrische Ströme erzeugen. Denn jede Änderung des magnetischen Feldes bezüglich seiner Richtung oder, wie in diesem Falle, seiner Grösse induciert in einem benachbarten geschlossenen Leiter mit einer Windung eine elektromotorische Kraft, die gleich der Anzahl der von ihm in der Zeiteinheit senkrecht geschnittenen Kraftlinien ist. Mittels des eingeschalteten Galvanometers konnte ich die elektromotorische Kraft des inducierten „Integralstromes" konstatieren und bei Zuhilfenahme des Erdinduktors im absoluten Masse (C.-G.-S.) messen.

Auf diese Weise fand ich beim Vorlegen oder Abreissen des Ankers tatsächlich einen wenn auch minimalen Ausschlag der Galvanometernadel. Die Rechnung ergiebt für die Änderung der Kraftlinienzahl im Querschnitt der neutralen Zone: $2460\,cm^{3/2}\,g^{1/2}\,sec^{-1}$. Der überhaupt vorhandene Kraftlinienstrom des ungeschlossenen Magneten beträgt $32950\,cm^{3/2}\,g^{1/2}\,sec^{-1}$, welche Zahl ich durch plötzliches Abziehen der Spule von dieser Stelle bis aus dem Bereich des Magneten ermittelte. Ein Vergleich beider Zahlen zeigt, dass erstere Änderung der Kraftlinienzahl nur

7,5 % von der Anzahl der vorhandenen beträgt. Mit Rücksicht auf die Versuchsanordnung scheint dieser geringe Prozentsatz in den Grenzen der Fehlerquellen zu liegen; um so mehr, als die starke Magnetisierung des Magneten (magnet. Moment pro Volumeneinheit $J = \frac{32\,950}{4\,\pi \cdot q}$ = ca. 390 $cm^{-1/2}$ $g^{1/2}$ sec^{-1}) wegen ihrer Zugkraft[1]) nur ein ruckweises Vorlegen des Ankers gestattet und ein Erschüttern des Magneten verursacht. Andererseits würde diese kleine Zunahme der Kraftlinienzahl keineswegs der beim Vorlegen des Ankers erfolgenden Abnahme des magnetischen Widerstandes entsprechen. Um eine angenäherte Vorstellung von der Grösse des Widerstandes und seiner Abnahme zu gewinnen, habe ich folgendes zu beachten:

Der magnetische Widerstand des ungeschlossenen Hufeisenmagneten setzt sich aus den beiden Teilen des magnetischen Kreises, dem Ferromagnetikum und dem Interferrikum, zusammen. Ersterer beträgt

$$F = \frac{\text{Länge}}{\text{Permeabilität} \cdot \text{Querschnitt}} = \frac{37{,}6}{\mu \cdot 6{,}69} = \frac{5{,}6}{\mu}\ cm^{-1}.$$

Für den Widerstand des Interferrikums J liegen die Verhältnisse nicht so einfach, weil zwischen den Polen im unmagnetischen Medium Streuung der Kraftlinien auftritt. Ein mit Eisenfeilicht hergestelltes Kraftlinienbild ergab, dass sie in grosser Anzahl angenähert als Halbkreise verlaufen. Forbes[2]) hat für die magnetische Leitfähigkeit des Interferrikums zwischen zwei gleichen rechteckigen ferro-

1) Wenn ich für das magnetische Moment J an den Polen denselben Wert ansetze wie den an der neutralen Stelle, so erhalte ich aus der Beziehung $\text{Zug} = \left(\frac{B}{5000}\right)^2$ für unseren Fall:

$$\text{Zug} = \left(\frac{4\,\pi\,J}{5000}\right)^2 = \left(\frac{4\,\pi \,.\, 390}{5000}\right)^2 = 0{,}97\ kg$$

d. h. Zug pro Querschnittseinheit gleich rund 1 kg Gewicht pro qcm.

2) Forbes, Journ. Soc. Telegr. Engineers 15. S. 551. 1886. Resultate auch in Du Bois, Magnetische Kreise, S. 211. 1894.

magnetischen Flächen, deren übertretende Kraftlinien Halbkreise sind, folgende Lösung gegeben: (vgl. Fig. 1.)

$$\text{Leitfähigkeit} = \frac{1}{\text{Widerstand}} = a \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{\pi \cdot r} = \frac{a}{\pi} \log \text{nat} \frac{d_2}{d_1}$$

$$J = \frac{\pi}{2{,}4 \log \text{nat} \frac{9{,}9}{4{,}3}} = 1{,}6 \text{ cm}^{-1}$$

Mithin beträgt der Gesamtwiderstand meines magnetischen Kreises unter Vernachlässigung der auf der ganzen Länge des Magneten gestreuten Kraftlinien

$$W = F + J = \frac{5{,}6}{\mu} + 1{,}6.$$

Setze ich für μ den der Magnetisierung 390 entsprechenden Wert rund 900[1]) an, so ist

$$W = 0{,}006 + 1{,}6$$

und der Widerstand des Interferrikums wäre über 200 mal so gross wie F. Wenn auch beim Vorlegen des Ankers J nicht bis auf wenige Tausendstel wegen der schlitzartigen Berührungsstellen verschwindet, so erleidet J doch eine beträchtliche Abnahme seines ursprünglichen Wertes. Selbst wenn ich für $\mu = 20$ ansetze, — aus einer mit diesem Magneten aufgenommenen Magnetisierungskurve fand ich unter Berücksichtigung des Entmagnetisierungsfaktors diese Zahl als durchschnittlichen Wert bis zu einer Feldstärke $H = 30$ hinauf — ergiebt die Gleichung $W = 0{,}3 + 1{,}6$ den Widerstand J ca. 5 mal grösser als F und unter der bescheidenen Annahme, dass der Widerstand beim Schliessen nur um die Hälfte sinke, müsste der Kraftlinienstrom um 100% wachsen. Unser Versuch hat aber nur die winzige Änderung von 7,5% gezeitigt. Da also eine Übereinstimmung nicht im geringsten erzielt worden ist, haben wir eine Änderung der Anzahl der in der indifferenten Stelle auftretenden Kraftlinien nicht bestätigt gefunden.

1) Kohlrausch, Leitfaden der prakt. Physik, Tabelle 24a. 1896.

Die von Pol zu Pol übertretenden Kraftlinien konnte ich wegen der Weite und der grossen Streuung des Interferrikums nicht bestimmen. Auch die Verdichtung derselben im Anker war bei dieser Anordnung, selbst angenähert, nicht zu messen. Ein Versuch, die Luftwiderstände der längs der Magnetschenkel divergierenden Kraftlinien für ungeschlossenen und geschlossenen Magneten mittels mühsam gezeichneter Kraftlinienbilder und ihrer Ausmessungen zu bestimmen, scheiterte, weil, wie zu erwarten war, die mathematischen Hilfsmittel nicht ausreichten.

Deshalb bemühte ich mich, die Versuchsverhältnisse günstiger anzuordnen, besonders dem Interferrikum eine einfache geometrische Gestalt zu verleihen.

Abschnitt 3.

Methode der Hauptversuche.

Zu diesem Behufe wählte ich als geometrische Gestalt meines Versuchskörpers einen kreisförmigen Ring mit ebenfalls kreisförmigem Querschnitt. Dieser so gestaltete Körper, ein Toroid genannt, bildet in seiner Magnetisierung einen vollkommenen magnetischen Kreis und dient als typisches Versuchsobjekt für die experimentelle Belegung in der Theorie. Seine Gestalt gestattet mir, dem Interferrikum eine einfache Form zu geben, nämlich die eines radialen Schlitzes mit parallel-wandigen Stirnflächen. Ein so geschlitztes Toroid ist zwar streng genommen kein vollkommener magnetischer Kreis, weicht aber in der ersten Annäherung nur wenig ab, sofern die Streuung in weitaus überwiegender Stärke auf die Nähe des Schlitzes beschränkt bleibt.

Wird ein ferromagnetisches Toroid ohne Schlitz durch eine gleichmässig über seinen Umfang verteilte Mag-

netisierungsspule magnetisiert, so tritt keine Induktionslinie in das umgebende Medium über. Der Ring bildet selber eine Induktionsröhre und der Induktionsfluss ist für jeden Querschnitt konstant. Ist das Gebilde mit einem radialen Schlitz versehen, so tritt Streuung der Magnetisierungslinien ein. Die auf den Stirnflächen auftretenden magnetischen Endelemente üben nämlich eine Fernwirkung aus und erzeugen ein eigenes magnetisches Feld. Letzteres ist dem Felde des Spulenstromes entgegengerichtet und macht sich in „selbstentmagnetisierender" Weise geltend, d. h. verringert die Magnetisierung in der Nähe der Stirnflächen. Das Herabdrücken der Magnetisierung kommt dadurch zum Ausdruck, dass die Magnetisierungsröhren, welche beim geschlossenen Toroid genau koncentrische Kreisröhren bilden, gegen die Nähe des Schlitzes zu sich bezüglich ihres Querschnitts ausdehnen und somit in das unmagnetische Medium divergieren. Diese Divergenz tritt eigentlich längs des ganzen Umfanges auf, jedoch von dem Schlitze nach der indifferenten Stelle zu schnell abnehmend.

Ich denke mir ein solches ferromagnetisches Gebilde in permanenten magnetischen Zustand versetzt und mittels Eisenfeilicht sein Kraftlinienbild entworfen. Fig. 2 soll eine schematische Vorstellung von dem Verlaufe der Kraftlinien und deren Streuung liefern. Eine grosse Anzahl der Kraftlinien verläuft peripherisch im Toroid, d. h. parallel zum Leitkreise des Ringes, und durchsetzt den Schlitz senkrecht. Der übrige Teil divergiert in das Medium, einen magnetischen Nebenschluss bildend. In der neutralen Stelle ist das Maximum der Kraftlinien vorhanden, denn diesen Querschnitt müssen sämtliche durchdringen. Ein auffälliger Umstand tritt in Erscheinung, dass die Kraftlinien beim Austritt in das unmagnetische Medium nahezu senkrecht zur Mantelfläche austreten. Jedoch ist dieser zur Trennungsfläche senkrechte Austritt eine Folge des tangentialen Brechungsgesetzes[1]) der Kraftlinien, welches an der Hand der Fig. 3

1) Beweis in Du Bois, Magnetische Kreise, S. 93. 1894.

lautet:

$$\frac{\operatorname{tg}\alpha'}{\operatorname{tg}\alpha} = \mu$$

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{1}{\mu}\operatorname{tg}\alpha'.$$

Selbst wenn α' hohe Werte, wie die Figur zeigt, besitzt, ist μ doch bedeutend grösser als $\operatorname{tg}\alpha'$, ausgenommen bei hohen Magnetisierungen, wo μ sich der Einheit nähert. Mithin folgt für α ein kleiner Wert; die Kraftlinien fallen im Interferrikum nahezu mit der Richtung der Normalen zusammen.

Ich gehe nun zur Methode meiner Versuche über, die ich mit mehreren solcher toroidaler permanenter Magnete anstellte. Der enge Schlitz gestattete mir, eine Änderung in der Anordnung des magnetischen Kreises bequem hervorzurufen. Nicht dadurch, dass ich den schmalen Luftspalt durch eine aus ferromagnetischer Substanz bestehende Scheibe ersetzte, was sich nicht genau und schnell hätte ausführen lassen, sondern dass ich die Stirnflächen durch einen leisen Druck auf den Ring zusammenpresste und ich so einen magnetischen Schluss von geringerem Widerstande erzielte. Diese Verminderung des magnetischen Widerstandes muss ihrerseits eine andere Anordnung der Verhältnisse bezüglich der vorhandenen Kraftlinien hervorrufen. Diese Veränderung des Kraftlinienbildes stellte ich fest mittels einer dünnen Drahtspule, welche mit einem ballistischen Galvanometer leitend verbunden war. Infolge der Induktion elektrischer Stromstösse konnte ich die Variation des von der Windung umschnürten Kraftlinienstromes messen — sei sie durch Verschieben der Spule selber oder durch Änderung der Kraftlinienanzahl bewirkt —.

A) Befestige ich die auf den Ring geschobene Spule in der neutralen Stelle und schliesse den Schlitz durch Zusammendrücken, dann müsste eine Vergrösserung des Kraftlinienstromes in diesem Querschnitt auftreten, falls ein permanenter Magnet nicht als der Sitz einer gewissen Kraftlinienanzahl anzusehen ist. Diese Existenz

neuer Kraftlinien würde sich in dem in der Windung eventuell inducierten Stromimpulse abspiegeln. Ist dagegen der elektromotorische Antrieb gleich Null, so würde daraus die Konstanz der vorhandenen Kraftlinien folgen.

B) Verschiebe ich die Spule von der neutralen Stelle bis zu einer Stirnfläche längs des Leitkreises des Ringes, so schneidet die Windungsfläche sämtliche auf dieser Strecke divergierenden Kraftlinien. Die im Innern peripherisch verlaufenden werden dabei nicht mitgemessen, da ihre Grösse und Lage zur Windung sich beim Verschieben nicht ändert.

C) Stelle ich denselben Versuch beim zusammengedrückten Schlitze an, so stellt die gefundene Grösse ein Mass für die trotz des besseren magnetischen Schlusses austretenden Kraftlinien dar.

D) Befestige ich die Windung im Schlitze, und zwar in seiner Ebene, so dass Spalt und Windungsfläche centriert sind, und biege dann den Ring zusammen zum Schlusse, so ist die im Leiter inducierte E. M. K. gleich der Verdichtung der Kraftlinien an dieser Stelle, d. h. gleich dem Zuwachs der völlig peripherisch verlaufenden Kraftlinien.

E) Ziehe ich die schmale Windung, nachdem sie im Spalt centriert war, durch letzteren hindurch, so werden sämtliche zwischen beiden Stirnflächen übertretenden Kraftlinien geschnitten.

Der Versuch A giebt für sich allein schon ein Kriterium der fraglichen Tatsachen an die Hand, ähnlich wie für den Hufeisenmagneten. Ganz unabhängig von ihm aber enthalten die drei Versuchszweige B, C, D in richtiger Kombination ebenfalls ein Kriterium. Unter der Annahme, dass ein permanenter Magnet eine konstante Anzahl von Kraftlinien im Querschnitt des Maximums besitzt d. h. an der indifferenten Stelle, drückt die Differenz der Grössen B und

C die Anzahl der im unmagnetischen Medium verschwindenden Kraftlinien aus, die infolge des geringeren magnetischen Widerstandes beim Zusammendrücken des Schlitzes ins Innere des Ferromagnetikums treten, mithin dadurch die Streuung verkleinern und den Zuwachs des peripherisch fliessenden Kraftlinienstromes an der Stelle des Schlitzes bilden. Andererseits liefert D den Zuwachs der im Innern des Toroids verlaufenden Kraftlinien für den Querschnitt des zusammengedrückten Schlitzes. Wenn also die Auffassung von der Konstanz der Kraftlinienzahl die richtige ist, so muss D nicht grösser sein, sondern gleich B — C, d. h. die beim Zusammendrücken des Ringes im Schlitz neu auftretenden Kraftlinien sind identisch mit den infolge eines geringeren magnetischen Widerstandes auf der halben Peripherie verschwindenden Kraftlinien, die beim geöffneten Ringe in die Umgebung divergierten. Ergiebt hingegen ein Vergleich dieser drei Werte, dass $D > B - C$ ist, so würde diese Ungleichung die Tatsache wiederspiegeln, dass ausser den verschwindenden ganz neue Kraftlinien auftreten, die, beim geöffneten Ringe überhaupt unvorhanden, das Innere des zusammengedrückten Toroids, also auch die indifferente Stelle durchsetzen. Damit wäre die Möglichkeit für die Konstanz der magnetomotorischen Kraft gegeben.

Abschnitt 4.

Hauptversuch mit einem Ring aus weichem Wolframstahl.

Zunächst sei Einiges über die Herstellung des permanenten Magneten vorausgeschickt. Aus einer zurechtgestauchten Platte Wolframstahls wurde ein geschlossenes Toroid sorgfältig abgedreht, dann bis zur Rotglut angelassen und vorsichtig abgekühlt, und zwar geschah das Anlassen

in einem mit Holzkohlenstaub angefüllten Kasten, welcher, beim Abkühlen völlig in Asche gehüllt, zur Inklinationsrichtung eine senkrechte Lage einnahm. Die Dimensionen des Ringes wurden durch Wägung und durch Ausmessung mit Hilfe eines Kathetometers bestimmt:

Querschnitt $q_1 = 0{,}3101$ qcm (geometrisch gefunden)
$q_2 = 0{,}3100$ qcm (durch Wägung)
Mittelwert $q = 0{,}3100$ qcm
Achsendurchmesser = 10,000 cm
Umfang d. Leitkreises = 31,417 cm
Querschnittsdurchm. = 0,628 cm
spezifisches Gewicht = 8,065

Um dieses Toroid in permanenten magnetischen Zustand zu versetzen, unterwarf ich es einer Magnetisierung, deren Remanenz den Ring zu einem Magneten machte. Die Magnetisierung steigerte ich durch Anwendung hoher Feldstärken bis in die Nähe der praktischen Sättigung, wie ja in dem citierten Aufsatze verlangt wurde. Die Bewickelungen des Ringes waren:

Primärspule: 3 Lagen 1 mm starken Drahtes mit 531 Windungen,

Sekundärspule: 1 Lage 0,5 mm starken Drahtes mit 483 Windungen.

Da hohe Stromstärken anzuwenden waren, war der Ring in einem Petroleumbad mit Eiskühlung aufgehängt worden. Mittels der ballistischen Methode bestimmte ich die aufsteigende und abnehmende Induktionskurve, um die Werte für Remanenz, Koercitivkraft und Permeabilität zu finden. Folgende Tabelle giebt aus den drei Zweigen einige Zahlen wieder: (vergl. Tafel I, Figur a. Ausführliche Versuchsdarstellung steht im Abschnitt 8).

H	B	μ	H	B	H	B
+ 0,1	11	—	302	19350	— 0,1	14760
10,6	1890	180	245	19000	10,5	+11740
21,9	11970	550	34,0	16260	16,0	Null
34,8	14540	418	21,3	15890	21,7	—10650
252	18960	75	10,4	15430	34,4	13230
302	19350	64	Null	14770	252	17730

Die Koercitivintensität H_C hat den Wert 16 C.-G.-S. und die Retentionsfähigkeit, d. i. das Verhältnis der remanenten Induktion zum vorhergegangenen Grenzwert derselben, beträgt 76%.

Nach Bestimmung dieser Normaleigenschaften wurde der Ring entmagnetisiert und zwar durch Wechselströme einer Dynamomaschine. Ihre Stromstärke wurde bis in dieselbe Höhe wie bei der Magnetisierung gesteigert und dann langsam bis auf Null verringert. Nachdem mittels einer Kreissäge ein radialer Schlitz von 0,08 cm Breite scharfkantig und eben ausgefräst worden war, wurde zum Vergleich eine entsprechende Induktionskurve aufgenommen. Sie ergab bei einer Remanenz von 10100 C.-G.-S. für die Retentionsfähigkeit 58%, für H_C denselben Wert 16 C.-G.-S. Das Auftreten der selbstentmagnetisierenden Intensität bedingt die Abnahme des remanenten Magnetismus, während die Koercitivintensität bekanntlich unabhängig von der geometrischen Gestalt des Versuchskörpers ist. Der remanente Magnetismus nimmt allerdings bald ab infolge antihysteretischer Erschütterungen bis auf einen Minimalwert, dessen Konstanz mit der Grösse der Koercitivintensität wächst. Diesem konstanten Wert verdankt mein Toroid die Eigenschaft eines permanenten Magneten.

Meine bei den Hauptversuchen verwendete Spule zählte 58 Windungen aus 0,32 mm starkem, mit Seide besponnenem Kupferdraht, welche auf ein schmales Hartgummiröllchen gewickelt waren. Ihr Widerstand betrug 0,645 Ω; der mittlere Durchmesser der Windungen war 1,27 cm. Er war mithin grösser als der des Ringquerschnitts gemacht worden, damit die Spule bequem auf dem Ringe verschoben werden konnte. Durch geringes Sperren des Ringes war es möglich, diese Spule durch den Schlitz auf den Ring zu bringen, wo sie dann für die Folgezeit verblieb. In die von ihr nach dem Galvanometer führende Leitung waren ausser einem Kommutator ein Widerstandskasten und Erdinduktor eingeschaltet. Der Ring wurde durch ein Holzstativ in freier fester Lage gehalten und war vom Galvanometer weit genug entfernt, um keinen direkten Einfluss auf dessen Nadel ausüben zu können.

Ich gehe zur Aufstellung meiner für die Ausrechnung zu benutzenden Formel über. Eine der wichtigsten Eigenschaften der Magnetoinduktion ist bekanntlich, dass die Änderungen des magnetischen Kraftlinienstromes die Induktion elektromotorischer Antriebe in einem diese Kraftlinien umschnürenden Leiter vollkommen bestimmen. Das Zeitintegral der inducierten E. M. K. ist numerisch gleich der Variation der Anzahl Kraftlinien, welche vom Leiter umschnürt werden. Sei δQ die Variation, so wird in jeder Windung eine E. M. K. erzeugt, die dieser Variation entspricht. Bedeutet N die Windungszahl der Spule, so ist

$$\int E\,dt = \delta Q \cdot N.$$

Ferner sei w der Gesamtwiderstand des Stromkreises, alsdann ist die Elektricitätsmenge, welche durch die Variation δQ ins Fliessen gebracht wird $\frac{\delta Q \cdot N}{w}$. Dieser Elektricitätsmenge, die während der Dauer des Stromstosses das Galvanometer durchfliesst, ist der Ausschlag α des Gal-

vanometers proportional

$$\frac{\delta Q \cdot N}{w} = C \cdot \alpha.$$

Um den Reduktionsfaktor C zu eliminieren, ist der Erdinduktor in den Stromkreis eingefügt. Beim plötzlichen Drehen des Erdinduktors um 180^0 werden $2F \cdot V$ Kraftlinien geschnitten, wo V die wirksame Vertikalkomponente des Erdmagnetismus und F die Windungsfläche des Erdinduktors bedeutet. Ist β der durch Drehung des letzteren erzeugte Ausschlag bei dem Widerstande w', so ist

$$\frac{2F \cdot V}{w'} = C \cdot \beta.$$

Durch Elimination von C folgt

$$\delta Q = \frac{\alpha \cdot w \cdot 2 \cdot F \cdot V}{\beta \cdot w' \cdot N}.$$

Wenn K die Kraftliniendichte d. h. die Anzahl der Kraftlinien pro qcm des Querschnitts bezeichnet, folgt

$$\delta Q = \delta K \cdot q,$$

wo q der Querschnitt des Ringes ist. Mithin erhalte ich die Variation in der Anzahl der Kraftlinien pro qcm des Ringquerschnitts

$$\delta K = \frac{\alpha \cdot w \cdot 2 \cdot F \cdot V}{\beta \cdot w' \cdot N \cdot q}.$$

Diese Formel behält ihre Brauchbarkeit für den vorliegenden Fall, dass der Querschnitt der Windungen grösser ist als derjenige des Ringes, weil die Kraftlinien im Toroid ihren Sitz haben. Spätere Versuche [1]) bestätigen die Richtigkeit des Gesagten.

Bemerkt sei hier noch, dass bei allen Versuchen ein ballistisches Galvanometer benutzt wurde, dessen Periode gross genug war im Vergleich zu der Dauer des Stromim-

1) Vergleiche S. 46.

pulses, so dass Proportionalität zwischen Ausschlag und inducierter Strommenge stets bestand.[1])

Versuchsergebnisse:[2])

B) Bestimmung der vom indifferenten Punkte bis zum Schlitz gestreuten Kraftlinien bei geöffnetem Ringe.

Das Längsführen meiner Probespule ergab als Anzahl der austretenden Kraftlinien für die eine Ringhälfte 4820 C.-G.-S., für die andere 4840 C.-G.-S. Die gute Übereinstimmung beider Zahlen steht zu erwarten, da die magnetischen Verhältnisse symmetrisch sein müssen zu beiden Hälften. Es konnte jedoch zweifelhaft erscheinen, ob die Bewegung des Galvanometers langsam genug war im Vergleich zu der Zeit, die zum Verschieben der Spule über die halbe Peripherie benötigt war, denn die inducierte Strommenge soll das Galvanometer bereits durchflossen haben, ehe die Ablenkung der Nadel aus der Ruhelage ihren Anfang nimmt. Deshalb teilte ich die beiden Ringhälften in je 8 Teile und führte für diese einzeln den Versuch aus. Die Summation dieser gewonnenen Zahlen darf keinen grösseren Wert liefern. Die Abgrenzung dieser einzelnen Teilstrecken geschah durch zwei Holzklammern (Fig. 4), welche, den Ring durch eine Messingfeder einklemmend, in der richtigen Entfernung aufgesetzt wurden. Ich lasse nun die Tabelle für die gestreuten Kraftlinien auf den einzelnen Teilstrecken folgen mit gleichzeitiger Angabe der Streuung in Prozenten (bezogen auf die Gesamtanzahl der gestreuten Kraftlinien). Dass die Werte für die Teilstrecken auf beiden Seiten nicht ganz gleich sind, ist darin begründet, dass die neutrale Stelle nicht diametral zum Schlitz liegt, sondern etwas nach der rechten Seite, um ungefähr 0,5 cm, verrückt ist. (Fig. 5.)

1) Näheres über das Galvanometer siehe S. 54.

2) Jeder wiedergegebene Zahlenwert stellt das Mittel von mindestens 10 Beobachtungen dar.

linke Hälfte			rechte Hälfte		
Teilstrecke	Austr. Kraftl.	Streuung %	Teilstrecke	Austr. Kraftl.	Streuung %
1) → 2)	36	0,8%	1) → 2)	12	0,3%
2) → 3)	141	3,3 „	2) → 3)	91	2,1 „
3) → 4)	286	6,6 „	3) → 4)	231	5,2 „
4) → 5)	366	8,5 „	4) → 5)	407	9,2 „
5) → 6)	534	12,4 „	5) → 6)	560	12,8 „
6) → 7)	632	14,6 „	6) → 7)	711	16,1 „
7) → 8)	920	21,3 „	7) → 8)	910	20,5 „
8) → 9)	1405	32,5 „	8) → 9)	1498	33,8 „
Summe:	4320	100,0%	Summe:	4420	100,0%
1) → 5)	920	19,3%	1) → 5)	800	16,8%
5) → 9)	3840	80,7 „	5) → 9)	3950	83,2 „
Summe:	4760	100,0%	Summe:	4750	100,0%
1) → 9)	4820		1) → 9)	4840	
Summe:	4820		Summe:	4840	

Die oben ausgesprochenen Zweifel an der Brauchbarkeit des Galvanometers sind unbegründet. Ein Vergleich der drei untereinander stehenden Summenwerte ergiebt nämlich, dass die Summationen der Werte für die Teilstrecken in beiden Fällen keinen grösseren Wert liefern als denjenigen, welcher durch das Längsführen der Spule über die ganze Strecke gewonnen wurde. Im Gegenteil folgt aus ihnen, dass der Gesamtwert kleiner ausfällt mit der Anzahl der Strecken, in die man den Umfang zerlegt. Diese auffallende Erscheinung findet meines Erachtens darin die Erklärung: Die Breite, welche die nebeneinanderliegenden Windungen meiner Spule einnahmen, verhinderte bei der

Einstellung der mittleren Windung auf den Teilstrich, dass sämtliche Windungen dieselben Kraftlinien schneiden. Wenigstens fand ich bei den späteren Versuchen,[1]) dass die Übereinstimmung eine um so bessere wurde, je dünner die Spule war.

Ausserdem gewähren die Werte für die Teilstrecken eine Übersicht über die Zunahme der Streuung nach dem Schlitze zu. So entfällt auf die beiden dem Schlitze benachbarten Teile der Hauptanteil der Streuung, nämlich 54%, während das erste Viertel des Umfanges nur mit 19% an der Streuung Anteil nimmt.

C) Bestimmung der divergierenden Kraftlinien bei zusammengedrücktem Ringe.

Es sei hier gleich bemerkt, dass zwar ein durch äussere Kräfte erzeugter Zwangszustand im Ferromagnetikum einen Einfluss auf die vorhandene Magnetisierung ausübt, in unserem Falle jedoch dieser Einfluss des durch Zusammendrücken des Ringes hervorgerufenen Zwangszustandes vernachlässigt werden kann, denn die Breite des Schlitzes von rund 1 mm beträgt noch nicht $^1/_{300}$ der ganzen Peripherie.

Der Schluss des Schlitzes wurde in möglichst gleichmässiger Weise durch eine hölzerne Schraubzwinge bewirkt, welche, an zwei diametral gegenüberliegenden Stellen angreifend, den Ring zusammenpresste und zwar so nur, dass die beiden Stirnflächen sich berührten ohne jeglichen Druck; dieser hätte nämlich für sich schon eine Verringerung des magnetischen Widerstandes der Schnittflächen zum Gefolge gehabt.[2])

Bei der jetzt folgenden Wiedergabe der Zahlenwerte unterdrücke ich die Zahlen für die eine Ringhälfte, z. B. die rechte, da sie nichts besonderes liefern würden.

---

1) Vergleiche S. 35 unten u. 45 oben.

2) Vergl. Ewing, Magnetische Induktion, § 164, S. 267. 1892.

linke Hälfte.

Teilstrecke	Austr. Kraftlinien	Prozentzahl	Verschwindende Kraftlinien B — C	Prozentzahl
1) → 2)	27	0,6 %	9	0,2 %
2) → 3)	121	2,8 „	20	0,5 „
3) → 4)	248	5,7 „	38	0,9 „
4) → 5)	297	6,9 „	69	1,6 „
5) → 6)	393	9,1 „	141	3,3 „
6) → 7)	369	8,5 „	263	6,1 „
7) → 8)	351	8,1 „	569	13,2 „
8) → 9)	194	4,5 „	1211	28,0 „
Summe:	2000	46,2 %	2320	53,8 %
1) → 5)	741	15,6 %	179	3,7 %
5) → 9)	1419	29,8 „	2421	50,9 „
Summe:	2160	45,4 %	2600	54,6 %
1) → 9)	2190	45 %	2630	55 %

Das Längsführen der Spule über den halben Umfang entlang konnte bei dieser Anordnung wegen der beiden Berührungsstellen der Holzzwinge nicht ausgeführt werden. Jedoch fand ich diesen Wert 219[illegible] aus den anderen, indem ich 45 %, welchen Prozentsatz die Summe von 1) bis 5) und 5) bis 9) für die divergierenden Kraftlinien ergiebt, von der in B gefundenen Zahl 4820 nehme.

Die Gesamtzahl der austretenden Kraftlinien hat beim geschlossenen Ringe über die Hälfte abgenommen, beträgt nur noch ca. 45 % von der Anzahl der ursprünglichen, und zwar verteilt sie sich auf den Umfang, wie die Prozentzahlen erkennen lassen, in wesentlich anderer Weise. Die

Streuung nimmt jetzt in der Nähe des Schlitzes merklich ab; das Maximum verschiebt sich fast bis in die Mitte zwischen Schlitz und neutraler Stelle. Die Hauptwirkung, die durch Veränderung des magnetischen Widerstandes hervorgerufen wird, beschränkt sich mithin auf die Umgebung des Schlitzes.

D) Messung der durch Schliessen des Ringes veränderten Kraftlinienzahl im Schlitze.

Die Spule war im Spalt centriert. Durch Zusammendrücken des Toroids ergab sich als Mittel aus zwei Beobachtungsreihen, welche die Versuche B und C zeitlich einschlossen, für die Veränderung der Kraftliniendichte im Schlitz der Wert 2570 C.-G.-S.

Denselben Versuch stellte ich mit einer aus einer Windung bestehenden Spule von demselben Querschnitt an und fand den gut übereinstimmenden Wert:

2580 C.-G.-S.

Dieser Wert stimmt tatsächlich mit der unabhängig gefundenen Anzahl der ins Innere tretenden Kraftlinien: B—C = 2630 C.-G.-S. überein; ihr Unterschied von 1,9 % fällt in den Bereich der Fehlergrenze.

E) Bestimmung der im Schlitz übertretenden Kraftlinien.

Meine Probespule war zu breit, um durch den Schlitz gezogen werden zu können. Deshalb benutzte ich die in D schon erwähnte von gleichem Querschnitt und erhielt beim schnellen Durchziehen die Zahl 3080 pro qcm des Ringes. Da ich aber infolge des grösseren Querschnitts der Windung bei diesem Versuche auch diejenigen Kraftlinien in Mitwirkung ziehe, die ausserhalb des eigentlichen Schlitzes liegen und schon vorher aus der Mantelfläche des Toroids ausgetreten sind, so ist der gefundene Wert ein zu grosser. Berechne ich die Anzahl aber pro qcm des Querschnitts der Windung, also 990 C.-G.-S., so fällt dieser Wert zu klein aus, da die Dichte der Kraftlinien im eigentlichen

Spalt bedeutend grösser ist als in der Umgebung. Zwischen beiden Zahlen muss der richtige Wert liegen. Der Mittelwert würde liefern als Anzahl der im Schlitz übertretenden Kraftlinien: $990 + 3080 = 4070 = 2040$ C.-G.-S.
Dasselbe wiederholte ich mit einer Windung, deren Querschnitt so nahe wie nur möglich mit dem des Ringes übereinstimmte, und fand 2080 C.-G.-S. (Unterschied beider Zahlen 2%.) Die verhältnismässig gute Übereinstimmung spricht für die Richtigkeit der ersten Zahl.

A) Messung der ev. Veränderung der Kraftlinienzahl in der neutralen Zone.

Meine Spule befand sich in der indifferenten Stelle, wo die im Ferromagnetikum verlaufende Kraftlinienzahl das Maximum der Kraftlinien bildet. Es setzt sich zusammen aus den längs des ganzen Umfanges innerhalb des Toroids verlaufenden Kraftlinien und den auf dieser Strecke aus der Mantelfläche divergierenden; mithin beträgt die Gesamtzahl der überhaupt vorhandenen Kraftlinien beim geöffneten Ringe

$$\text{Maximum} = 2080 + 4820 = 6900 \text{ C.-G.-S.}$$

Beim Zusammenpressen des Ringes belief sich die etwaige Änderung dieser Kraftlinienzahl auf 40 C.-G.-S., welche Zahl bezüglich des Maximums verschwindender Natur ist. Sie macht nur 0,6% aus und entspringt den Beobachtungsfehlern.

Resultat: Die durch Zusammendrücken des Schlitzes bewirkte Verringerung des magnetischen Widerstandes erzeugt keine neuen Kraftlinien, vielmehr bleibt die Gesamtanzahl der vorhandenen konstant (Versuch A). Die einzige Folge der Abnahme des Widerstandes und der damit bedingten Verbesserung des magnetischen Schlusses ist die Verringerung der Streuung, denn der grösste Teil (in unserem Falle 55%) der vorher divergierenden Kraftlinien tritt ins Innere des Ferromagnetikums. Die im Schlitz auftretenden Kraftlinien sind identisch mit diesen verschwindenden. (Versuch: $B - C = D$.)

Streuungskoeffizient.

Im Anschluss hieran seien die Streuungsverhältnisse für geöffneten und geschlossenen Ring erörtert unter Berücksichtigung des Streuungskoeffizienten.[1])

Als das Mass der Streuung betrachtet man nämlich das Verhältnis des mittleren Induktionsflusses, d. i. sein Mittelwert über den ganzen Umfang, sofern letzterer durch die ferromagnetische Substanz erfüllt ist, zu demjenigen im Schlitze, wo er wegen der Divergenz der Induktionsröhren seinen geringsten Wert aufweist. In dem vorliegenden Falle des permanenten Magneten hat man analog anzusetzen: Der Streuungskoeffizient ν ist gleich dem Mittelwerte der im Innern des Magneten von der neutralen Zone bis zum Schlitz verlaufenden Kraftlinien dividiert durch die Anzahl der durch die beiden Stirnflächen übertretenden Kraftlinien,

also $$\nu = \frac{K_{\text{Ring}}}{K_{\text{Schlitz}}} \qquad [\nu \geq 1]$$

Diese Zahl ν ist naturgemäss mindestens gleich, im allgemeinen aber grösser als Eins.

Die Anzahl der Kraftlinien im Schlitz ist nach Versuch E gleich 2080. Dagegen ist der Mittelwert K_{Ring} nicht direkt bekannt, nur das Maximum in der neutralen Stelle ist gegeben mit 6900. Dieser Wert fällt keineswegs gleichmässig nach dem Schlitze zu ab, weil die Streuung, wie die obigen Versuche zeigten, erst mit der Nähe der Enden hauptsächlich in Wirksamkeit tritt. Bis über das erste Viertel hinaus von der neutralen Stelle ab fliesst ein ziemlich konstanter Kraftlinienstrom. Das arithmetische Mittel beider Zahlen 4490 würde dem Mittelwerte entsprechen nur in dem Falle der gleichmässigen Divergenz. Um nun den hier obwaltenden Verhältnissen Rechnung zu tragen, mache ich folgenden Ansatz:[2]) Ist l die Länge des Magneten vom Maximum bis zum Minimum, x die peripherische Ent-

1) Vergl. Du Bois, Magnetische Kreise, S. 121. 1894.

2) Der durch graphische Darstellung berechnete Mittelwert fiel zu ungenau aus.

fernung des als bekannt vorausgesetzten Mittelwerts vom Maximum ab, so muss das Produkt aus dem Unterschied zwischen Mittelwert und einem Endwert in die gegenseitige Entfernung absolut gleich sein, also

$$(\text{Max} - \text{Mit}) \cdot x = (\text{Mit} - \text{Min}) \cdot (l - x)$$

$$x = \frac{l\,(\text{Mit} - \text{Min})}{\text{Max} - \text{Min}}.$$

Diese Beziehung enthält zwar zwei Unbekannte, den Mittelwert und dessen Entfernung x vom Maximum; jedoch bietet mir das durch die Versuchsreihe B numerisch ausgedrückte Verhalten der Streuung mit der Entfernung ein Hilfsmittel, diese Grössen näherungsweise zu finden. Für jeden Querschnitt des Toroids, dessen peripherische Entfernung von der indifferenten Stelle ich geometrisch ausmessen kann, finde ich vermittels angeführter Versuche den dort herrschenden Kraftlinienstrom, indem ich die bis zu dieser Stelle gemessenen austretenden Kraftlinien von dem Maximalwerte abziehe. Setze ich nun einen beliebigen Wert des angenommenen Mittelwerts in obige Gleichung ein, so wird natürlich im allgemeinen der hieraus berechnete Wert für x keineswegs mit dem gemessenen Werte der zu diesem Querschnitt gehörenden Entfernung übereinstimmen. Wenn aber der eingesetzte Wert eine Übereinstimmung zwischen $x_{berechnet}$ und $x_{gemessen}$ ergiebt, dann stellt er tatsächlich den unter diesen Streuungsverhältnissen zutreffenden Mittelwert des Kraftlinienstromes dar, den wir oben mit K_{Ring} bezeichnet haben. Durch methodisches, probeweise vorgenommenes Einsetzen von verschiedenen Werten wird man schnell diese Übereinstimmung nahe genug erzielen können. Die gegebenen Zahlen sind

$$\text{Max} = 6900 \quad \text{Min} = 2080 \quad l = 16{,}15 \text{ cm}.$$

An dem Teilstrich 6) meines Ringes beträgt die Anzahl der dort im Innern verlaufenden Kraftlinien

$$6900 - (917 + 534) = 5450.$$

Die Entfernung dieser Stelle vom Maximum ist 10,31 cm,

also $x_{gemessen} = 10{,}31$ cm. Die Einsetzung dieses Mittelwertes 5450 ergiebt für

$$x = \frac{16{,}15\,(5450 - 2080)}{6900 - 2080} = 11{,}31 \text{ cm}.$$

Ein Vergleich zeigt: $x_{berechnet} > x_{gemessen}$.

Führe ich nun diese Rechnung für den um 0,5 cm näher an den Schlitz grenzenden Querschnitt aus, so habe ich zu berücksichtigen, dass auf der Teilstrecke 6) → 7), deren Länge 1,96 cm beträgt, laut Versuch B 632 Kraftlinien austreten. Unter der annähernd zutreffenden Annahme, dass die Streuung über diese kurze Strecke gleichmässig erfolgt, ist die Anzahl der bis zu diesem Querschnitt noch austretenden Kraftlinien $\frac{632 \cdot 0{,}5}{1{,}96} = 161$, mithin der betreffende Mittelwert $5450 - 160 = 5290$. Es folgt

$$x = \frac{16{,}15\,(5290 - 2080)}{4820} = 10{,}76 \text{ cm}$$

$$x_{gemessen} = 10{,}31 + 0{,}5 = 10{,}81 \text{ cm}.$$

Also $x_{berechnet} < x_{gemessen}$.

Zwischen beiden betrachteten Stellen muss die Stelle des Mittelwerts liegen; die Rechnung ergiebt für den Querschnitt, der von 6) um 0,47 cm nach dem Schlitze zu entfernt liegt, folgende Werte:

$$x_{gemessen} = 10{,}78 \text{ cm}$$

$$x = \frac{16{,}15\,(5300 - 2080)}{4820} = 10{,}79 \text{ cm}.$$

Also $x_{berechnet} = x_{gemessen}$.

Folglich ist der Mittelwert $= K_{Ring} = 5300$ C.-G.-S., daraus folgt für den geöffneten Ring der Streuungskoeffizient

$$\nu_{offen} = \frac{5300}{2080} = 2{,}55.$$

Analog verfahre ich nun mit der Ausrechnung des Streuungskoeffizienten für zusammengedrücktes Toroid.

Das Maximum beträgt nach wie vor 6900. Den Schlitz durchsetzen jetzt ausser der vorhandenen Anzahl 2080 noch

die ins Innere getretenen Kraftlinien, deren Höhe sich nach Versuch D und B — C im Mittel auf 2600 beläuft. Demnach ist das Minimum = 2080 + 2600 = 4680.

Bis zum Teilstriche 6) sind ausgetreten laut Versuch C:

1) bis 5) + 5) bis 6) = 741 + 393 = 1134.

Mithin beträgt hier die Kraftlinienzahl

$$6900 - 1134 = 5766 \text{ C.-G.-S.}$$

Demnach

$$x = \frac{16{,}15\,(5770 - 4680)}{6900 - 4680} = \frac{16{,}15 \cdot 1090}{2220} = 7{,}91 \text{ cm}$$

$$x_{gemessen} = 10{,}31 \text{ cm}$$

Also $x_{berechnet} < x_{gemessen}$.

An Stelle 5) beträgt der Mittelwert 6900 — 741 = 6159, mithin

$$x = \frac{16{,}15\,(6160 - 4680)}{2220} = 10{,}77 \text{ cm}$$

$$x_{gemessen} = 8{,}35 \text{ cm}$$

Also $x_{berechnet} > x_{gemessen}$.

Zwischen beiden Teilstrichen und zwar um 1 cm von der Mitte nach dem Schlitze zu entfernt liegt der Mittelwert $6160 - \frac{393}{1{,}96} = 5960$, denn laut C treten auf der Teilstrecke 5) bis 6) 393 Kraftlinien aus.

$$x = \frac{16{,}15\,(5960 - 4680)}{2220} = 9{,}32 \text{ cm}$$

$$x_{gemessen} = 9{,}35 \text{ cm}$$

Also $x_{berechnet} = x_{gemessen}$ (nur 0,3 % Unterschied).

Der Mittelwert beträgt für den zusammengedrückten Ring also 5960 C.-G.-S. und liegt um 1,5 cm mehr nach der Mitte zu als wie beim offenen Ringe. Versuch C zeigte ja auch, dass die Streuung beim geschlossenen Ringe mehr auf die ganze Länge verteilt ist und nach dem Schlitze zu sogar abnimmt. Für den Streuungskoeffizienten erhalte ich demnach

$$\nu_{geschlossen} = \frac{5960}{4680} = 1{,}27.$$

Ein Vergleich beider Koeffizienten sagt aus, dass durch Zusammendrücken des Schlitzes die Streuung um die Hälfte verringert wird und sich beträchtlich der Einheit nähert, welche Grösse ein vollkommenes geschlossenes Toroid voraussetzt.

Abschnitt 5.

Hauptversuch mit einem Ring aus gehärtetem Wolframstahl.

Die im vorigen Abschnitt niedergelegten Versuchsergebnisse waren erzielt worden an einem Toroid aus sogenanntem weichem Wolframstahl. Diese Eigenschaft der Weichheit bedingt eine für die betreffende Sorte verhältnismässig geringe Koercitivkraft, die man beträchtlich steigern kann durch künstliches Härten des Materials. Dadurch ist es gelungen, der Koercitivintensität Maximalwerte von 50 bis 60 C.-G.-S. zuzueignen. Da die Grösse von H_c ihrerseits eine hohe Konstanz des remanenten Magnetismus, wie früher schon erwähnt, gewährleistet und einen Magneten deshalb zu einem wirklich permanenten erst stempelt, setzte ich meine experimentelle Prüfung an einem derartig beschaffenen Versuchsobjekte fort.

Aus der beim ersten Ringe verwendeten Wolframstahlsorte liess ich ein Toroid von annähernd gleichen Dimensionen sorgfältig abdrehen und unterwarf es vor der Magnetisierung der Härtung. In Holzkohle völlig eingepackt, wurde der Ring bis zur Rotglut erhitzt und dann in Wasser, dem etwas Schwefelsäure zugesetzt war, plötzlich abgeschreckt. Geometrische Verzerrungen bezüglich seiner Gestalt traten nicht auf; der Ring hatte folgende Daten:

Querschnitt q_1 = 0,3938 qcm (geometrisch gefunden)
„ q_2 = 0,3940 qcm (durch Wägung)
Mittelwert q = 0,3939 qcm
Durchm. d. Leitkreises = 9,919 cm
Umfang „ „ = 31,161 cm
Querschnittsdurchm. = 0,708 cm
spezifisches Gewicht = 8,068

Hierauf wurde die Magnetisierung in gleicher Weise vorgenommen.

Primärspule: 3 Lagen aus 1 mm starkem Kupferdraht mit 504 Windungen,

Sekundärspule: 1 Lage aus 0,5 mm starkem Draht mit 465 Windungen.

Zur Charakteristik des magnetischen Verhaltens seien einige Zahlen wiedergegeben: (vergl. Abschnitt 8 u. Tafel I, Fig. b.)

H	B	μ	H	B	H	B
+ 0,1	6	43	Von 295	15420	— 0,5	10490
0,5	19	35	↓	↓	1,4	10460
1,5	56	38			9,9	10040
10,0	415	42			61,0	+1510
78,7	9280	118			63,0	Null
92,3	10980	119			68,7	—5250
111,8	12230	109			111,8	12090
251	15010	60			253	14740
295	15420	52	bis Null	10500	296	15145

Wir entnehmen aus dieser Tabelle für H_c = 63 C.-G.-S.; ein selten hoher Wert (beim weichen Ringe betrug die Koercitivintensität nur 16 C.-G.-S.). Im Zusammenhange mit dieser Vergrösserung steht die Verringerung der Permeabilität des Materials. Obgleich die Feldstärke ziemlich dasselbe Maximum 300 C.-G.-S. erreicht, steigt B nur bis 15500, während bei weichem Material die Maximalinduktion

19300 beträgt. Die Kolumne für μ bringt es ebenfalls zum Ausdruck: μ variiert in geringen Grenzen, als sein grösster Wert nur 120 beträgt ($\mu_{weich} = 550$), und zwar tritt dieses Maximum für die halbe Sättigung der Magnetisierung ein. Es ist nämlich

$$J = \frac{B - H}{4\pi} = \frac{10980 - 92}{4\pi} = 866 \text{ C.-G.-S.}$$

Die praktische Sättigung für Stahl beträgt bekanntlich ca. 1700 C.-G.-S., mithin entspricht der gefundene Wert der halben Sättigung. Der remanente Magnetismus nimmt mit der Härte des Materials auch ab, wir finden für die Retentionsfähigkeit den Wert 68 %. Vergrösserung der Koercitivintensität und Abnahme der Remanenz bei gehärtetem Stahl bedingen die Rundung der Hysteresiskurven im Gegensatz zu den schmalen langgestreckten Kurven desselben Materials in weichem Zustande. (Vergleiche Tafel I, Fig. a und b.)

Das Schlitzen des Toroids erheischte in diesem Falle besondere Vorsicht wegen der ausserordentlichen Härte des Stahles. Mittels der Kreissäge den Ring zu schlitzen, musste aufgegeben werden. Dagegen bewährte sich feiner, feuchter Sand als gutes Schleifmittel. Eine ca. 1 mm starke auf der Drehbank eingesetzte Kupferscheibe lief durch ein feuchtes Sandbad. Die von der Rotation der Scheibe mitgerissenen Sandkörnchen verursachten ein beständiges, gleichmässiges Durchschleifen des Eisenkerns. Diese 3 Stunden dauernde mühsame Operation war vom besten Erfolge gekrönt, sofern der Schlitz bezüglich seiner Gestalt scharfkantig war und gleichmässige Dicke besass. Mittels feinen, ölbenetzten Schmirgelpapiers wurden die Stirnflächen völlig eben poliert. Die Breite des Schlitzes ergab das Kathetometer:

$$d = 0{,}121 \text{ cm.}$$

Nachdem der Schlitz von einem magnetisch indifferenten Messingscheibchen ausgefüllt war, wurden die Primär- und Sekundärspulen hergestellt und dann die Magnetisierung vorgenommen. Der in der Tabelle angegebene Wert für H ist nicht die tatsächlich im Stahl herrschende magnetische

Intensität, sondern die von der Spule erzeugte Feldstärke, weil die selbstentmagnetisierende Intensität letzterer entgegenwirkt.

$H_{(Spule)}$	B	$H_{(Spule)}$	B	$H_{(Spule)}$	B
		Von			
+ 0,4	16	287	15230	— 0,4	9730
9,9	380	↓	↓	9,9	9230
78,2	7330			60,6	+ 975
91,4	9360			63,0	Null
110,2	11050			68,2	— 2430
247	14770			245	13900
287	15230	bis Null	9740	284	14320

Die Koercitivintensität ergiebt, wie zu erwarten ist, denselben Wert $H_C = 63$ C.-G.-S. Die Abnahme der remanenten Induktion $B_{R\ m.}$ ist nur gering, denn die Retentionsfähigkeit sinkt von 68 % nur auf 64 %. Eine gleichzeitige Beobachtung der Induktion im Schlitze[1]) ergab für die Remanenz $B_{Rem.\ (Schlitz)} = 2250$ C.-G.-S.

Bei der Anfertigung meiner Probespule beachtete ich, dass sie schmal ausfiel, weil die Differenz zwischen den Summenwerten aus der Breite der Spule entsprang, wie ich ja aus den Versuchen mit dem ersten Toroid zu schliessen glaubte. Die Spule hatte folgende Daten:

Innendurchmesser = 0,747 cm
(Ringdurchmesser = 0,708 cm)
3 Lagen à 8 Windungen aus 0,014 cm starkem Draht = 24 Windungen
Widerstand = 1,815 Ω
Spulenquerschnitt = 0,522 qcm
(Ringquerschnitt = 0,3939 qcm)
Breite der Spule = 0,215 cm

1) Näheres hierüber im Abschnitt 8, S. 61 ff.

In Bezug auf die Haltbarkeit dieser Spule sei noch bemerkt, dass die Drahtenden in einer Glasröhre eingeschmolzen waren, die ihrerseits mit dem Hartgummiröllchen durch Schellack fest verbunden war.

Versuchsergebnisse:

B) Messung der gestreuten Kraftlinien im geöffneten Zustande des Toroids.

Die indifferente Stelle liegt, wie diesbezügliche Untersuchung ergab, auf der rechten Hälfte des Ringes nahe am Teilstrich 2).

linke Hälfte			rechte Hälfte		
Teilstrecke	Austr. Kraftl.	in Prozenten	Teilstrecke	Austr. Kraftl.	in Prozenten
Neutrale Stelle bis 1)	17	0,3 %			
1) → 2)	55	0,9 „	1) → 2)	5	0,1 %
2) → 3)	60	1,0 „	2) → 3)	56	0,9 „
3) → 4)	70	1,2 „	3) → 4)	129	2,2 „
4) → 5)	147	2,3 „	4) → 5)	243	4,1 „
5) → 6)	354	5,9 „	5) → 6)	388	6,5 „
6) → 7)	738	12,3 „	6) → 7)	689	11,5 „
7) → 8)	1346	22,3 „	7) → 8)	1395	23,2 „
8) → 9)	3243	53,8 „	8) → 9)	3085	51,5 „
Summe:	6030	100,0 %	Summe:	5990	100,0 %
1) → 9)	6110		1) → 9)	6080	

Beide Ringhälften stimmen in ihren Endwerten gut überein. Die annähernde Übereinstimmung der Zahlen 6030 und 6110 (Unterschied 1,3 %) spricht dafür, dass die beim ersten Hauptversuche gefundene Differenz nur an der Beschaffenheit der Spule, nämlich an der verhältnismässig

grösseren Breite gelegen hat. Je schmaler die Spule ist, d. h. je vollkommener sie sich einer mathematischen Windung nähert, desto grösser die Gleichheit. Die Tabelle ergiebt ferner, dass bei dem gehärteten Toroid die Streuung noch mehr auf die Nähe des Schlitzes gedrängt wird (trotz der grösseren Breite des Schlitzes). Über 75 % der gestreuten Kraftlinien entfallen allein auf die letzten beiden Teilstrecken, während von 1) bis 5), also auf dem halben Wege, der Streuungsanteil fast verschwindet, nur = 5,5 %. Die streuende Wirkung eines Schlitzes rückt demnach mit der Härte des Materials des Ringes mehr in die Nähe seiner Enden.

C) Bestimmung der divergierenden Kraftlinien bei zusammengedrücktem Ringe.

linke Hälfte.

Teilstrecke	Austr. Kraftlinien	in Prozenten	Verschwindende Kraftlinien B — C	in Prozenten
Neutrale Stelle bis 1)	16	0,3 %	1	0,0 %
1) → 2)	50	0,8 „	5	0,1 „
2) → 3)	55	0,9 „	5	0,1 „
3) → 4)	60	1,0 „	10	0,2 „
4) → 5)	107	1,8 „	40	0,5 „
5) → 6)	270	4,4 „	84	1,5 „
6) → 7)	507	8,4 „	231	3,9 „
7) → 8)	759	12,6 „	587	9,7 „
8) → 9)	726	12,1 „	2517	41,7 „
Summe:	2550	42,3 %	3480	57,7 %
1) → 9)	2580	42,3 %	3530	57,7 %

Der letzte Wert ist aus der entsprechenden Zahl 6110 gewonnen, indem ich den gefundenen Prozentsatz von 42% in Anrechnung brachte.

Nur noch 42%, also weniger als die Hälfte der ursprünglich austretenden Kraftlinien, divergieren jetzt. Es sind mithin 58 % Kraftlinien ins Innere getreten. Die Kolumne der Prozente lässt die Anteilnahme der einzelnen Strecken an der Streuung gut erkennen. Die dem Schlitz unmittelbar benachbarte Teilstrecke wird am meisten beeinflusst von der Abnahme der Streuung. Über die Hälfte aller divergierenden Kraftlinien nehmen erst hier ihren Austritt ins unmagnetische Medium, welche aber auch jetzt bei der Vervollkommnung des magnetischen Kreises gezwungen werden, in überwiegender Stärke ins Innere des Ferromagnetikums zu treten.

Die Gesamtzahl der verschwindenden Kraftlinien beträgt 3530 C.-G.-S.

D)

Die Spule ist im Spalt befestigt. Beim Zusammendrücken des Ringes ergiebt sich als Zuwachs der hier übertretenden Kraftlinien 3630 C.-G.-S. Nach unserem bisher gefundenen Resultat müssen diese beiden Zahlen gleich sein, weil die in beiden Fällen gemessenen Kraftlinien identisch sein sollen. Sie stimmen bis auf 2,7% überein, welch' geringer Prozentsatz zweifelsohne den Fehlerquellen entspringt. Wir sind zu dieser Behauptung um so mehr berechtigt, als beim ersten Toroid $D < B - C$, hier $D > B - C$ ist.

Dieselben Versuche stellte ich mit einer Spule an, die aus einer einzelnen Windung bestand; ihr Querschnitt war = 0,587 qcm. Trotzdem einerseits ihr Querschnitt etwas grösser war als der der Probespule, andererseits etwaige Fehler, die die Breite der Spule zur Ursache hatten, wegfallen mussten, zeigen diese Ergebnisse eine zufrieden stellende Übereinstimmung mit den vorigen und rechtfertigen ihre Richtigkeit:

B)	1) → 9)	6110	1) → 5)	342
			5) → 9)	5808
			Summe:	6150
C)	1) → 9)	2520	1) → 5)	277
			5) → 9)	2263
			Summe:	2540
B) — C)		3590		3610
				3600
D)		3640		

Mithin B — C = D (Unterschied 1,1 %)

E) Bestimmung der im Schlitz übertretenden Kraftlinien.

Das plötzliche Durchziehen einer Windung von demselben Querschnitt meiner Probespule (0,522 qcm) ergab als Anzahl der geschnittenen Kraftlinien 3560 pro qcm des Ringes. Da der Ringquerschnitt nur 0,394 qcm beträgt, so werden bei diesem Versuche noch die Kraftlinien geschnitten, die dem cylinderförmigen Raum des Schlitzes dicht benachbart sind. Berechne ich die Induktion pro qcm der Windung = 2680, so erhalte ich, wie schon früher erwähnt, einen zu kleinen Wert. Ich setze demnach wieder als wahrscheinlichen Wert den Mittelwert beider Zahlen: 3120 C.-G.-S. Zur Kontrolle stellte ich diese Versuche an für Windungen von grösserem Querschnitt:

Windungs-querschnitt	Kraftlinien-zahl pro qcm des Ringes	Kraftlinien-zahl pro qcm der Windung	Mittelwert
0,587	3850	2590	3210 } 3125
0,876	4190	1890	3040 }

Die beiden Mittelwerte unterscheiden sich von obigem Werte um + 3 % und — 3 %, stimmen in ihrem Mittel mit letzterem überein.

A)

Die Probespule ist in der indifferenten Stelle fixiert Das hier herrschende Maximum der überhaupt vorhandenen Kraftlinien setzt sich zusammen aus $6110 + 3120 = 9230$ C.-G.-S. Beim Schliessen des Schlitzes erhielt ich eine Variation für diese Zahl in der Höhe von 16 C.-G.-S., also 0,02 %. Mithin tritt keine Änderung in der Anzahl der dort vorhandenen Kraftlinien auf.

Resultat: Die Anzahl der überhaupt vorhandenen Kraftlinien ist für den permanenten Magneten konstant (wie beim ersten Ringe).

Nebenbei ergiebt ein Vergleich mit der Induktionskurve, dass von dem dort gefundenen Mittelwerte der remanenten Induktion 9740 konstant geblieben sind in dem Magneten 9230 C.-G.-S.; also nur um ca. 5 % hat jener Wert abgenommen. Dieses günstige Resultat ist durch die ausserordentlich hohe Koercitivintensität verursacht.

Streuungskoeffizient:

Für geöffneten Ring:

Es ist $\nu = \frac{K_{Ring}}{K_{Schlitz}}$.

Zur Ermittelung von K_{Ring} wende ich die abgeleitete Beziehung an:

$$x = \frac{l\,(Mit - Min)}{Max - Min}$$

$Max = 9230$ $\quad Min = 3120$ $\quad l = 16{,}82$ cm.

Teilstrich 6): Von der indifferenten Stelle bis hierher sind ausgetreten laut B) 700 C.-G.-S., mithin beträgt der Kraftlinienwert in diesem Querschnitt noch $9230 - 700 = 8530$ C.-G.-S.

$$x_{berechnet} = \frac{16{,}82\,(8530 - 3120)}{9230 - 3120} = \frac{16{,}82 \cdot 5410}{6110} =$$

$$= 14{,}89 \text{ cm}$$

$$x_{gemessen} = 11{,}00 \text{ cm}$$

Mithin $x_{berechnet} > x_{gemessen}$.

Teilstrich 7): Auf der Teilstrecke 6) bis 7) treten laut B noch aus 740 C.-G.-S., mithin würden in diesem Querschnitt an Kraftlinien vorhanden sein 8530 — 740 = 7790 C.-G.-S. Demnach

$$x = \frac{16{,}82\,(7790 - 3120)}{6110} = 12{,}85 \text{ cm}$$

$$x_{gemessen} = 11{,}00 + 1{,}94 = 12{,}94 \text{ cm}$$

Mithin $x_{berechnet} < x_{gemessen}$.

Der richtige Mittelwert muss zwischen diesen beiden Stellen liegen und zwar dicht bei 7). Es ergiebt die Rechnung für $x_{gemessen} = 12{,}90$ cm, also nur 0,04 cm vor 7), folgenden Wert für

$$x_{berechnet} = \frac{16{,}82\,(7805 - 3120)}{6110} = 12{,}90 \text{ cm}.$$

Der Mittelwert 7805 findet sich aus

$$7790 + \frac{740 \cdot 0{,}04}{1{,}94} = 7805 \text{ C.-G.-S.}$$

Also $x_{berechnet} = x_{gemessen}$.

Der Streuungskoeffizient für das geöffnete Toroid hat den Wert

$$\nu_{offen} = \frac{7810}{3120} = \mathbf{2{,}50}$$ im Vergleich zum ersten Ringe:

$$\nu = 2{,}55.$$

Die Streuung hat für diesen Ring trotz des grösseren Schlitzes abgenommen. Zu bemerken ist noch, dass der Mittelwert sehr nahe an den Schlitz rückt, denn er ist vom letzteren nur um ein Achtel des Umfangs entfernt. Das drückt die Tatsache aus, dass die Streuung hauptsächlich auf die Nähen der Enden beschränkt bleibt, welches Resultat sich aus dem Versuche B ebenfalls ergab.

Für zusammengedrückten Ring:

$$\nu_{geschlossen} = \frac{K_{Ring}}{K_{Schlitz}}$$

$K_{Schlitz}$ setzt sich zusammen aus den schon vorhandenen

3120 und den beim Schlusse des Ringes peripherisch verlaufenden Kraftlinien, welche Zahl wir aus B — C oder D entnehmen können. Mithin $K_{Schlitz} = 3120 + 3600 = 6720$ C.-G.-S. Das Maximum der überhaupt vorhandenen Kraftlinien bleibt unverändert: Max = 9230.

Teilstrich 6): Laut Versuch C sind bis zu dieser Stelle ausgetreten 558, es verlaufen im Innern des Magneten noch 9230 — 560 = 8670 C.-G.-S. Es folgt

$$x = \frac{16{,}82\,(8670 - 6720)}{9230 - 6720} = \frac{16{,}82 \cdot 1950}{2510}$$

$x_{berechnet} = 13{,}07$ cm

$x_{gemessen} = 11{,}00$ cm

Also $x_{berechnet} > x_{gemessen}$.

In dem um 1 cm weiter nach 7) zu liegenden Querschnitt, also für $x_{gemessen} = 12{,}00$ cm, beläuft sich der Kraftlinienstrom auf

$$8670 - \frac{507}{1{,}94} = 8670 - 260 = 8410 \text{ C.-G.-S.}$$

denn auf der Teilstrecke 6) bis 7) sind noch ausgetreten laut C: 507 C.-G.-S.

$$x_{berechnet} = \frac{16{,}82\,(8410 - 6720)}{2510} = 11{,}32 \text{ cm}$$

$x_{gemessen} = 12{,}00$ cm

Also $x_{berechnet} < x_{gemessen}$.

Zwischen beiden Stellen und zwar für $x_{gemessen} = 11{,}75$ cm beträgt der Mittelwert $= 8670 - \frac{507 \cdot 0{,}75}{1{,}94} = 8474$ C.-G.-S.

Demnach ist

$$x_{berechnet} = \frac{16{,}82\,(8474 - 6720)}{2510} = 11{,}76 \text{ cm}$$

$x_{gemessen} = 11{,}75$ cm

Also $x_{berechnet} = x_{gemessen}$.

Daraus folgt endlich für den Streuungskoeffizienten des zusammengedrückten Ringes:

$$\nu_{\text{geschlossen}} = \frac{8470}{6720} = 1{,}26.$$

Die Streuung hat sich demnach fast genau um die Hälfte verringert und strebt merklich der Einheit zu.

Abschnitt 6.

Hauptversuch mit einem Toroid aus Wolframstahl Marke W. I. G. von Böhler & Co.

Einen äusserst sorgfältig gearbeiteten und daher homogenen Wolframstahl bringt die Firma Gebr. Böhler & Co., Wien, in den Handel. Eine dieser in ihrer chemischen Zusammensetzung festgelegten Sorten trägt die Erkennungsmarke W. I. G. Da mir ein Ring dieses Stahls mit rechteckigem Profil zur Verfügung stand, zog ich ihn in den Bereich meiner Untersuchungen. Zu dem Ende liess ich diesen Reifring sorgfältigst zu einem Toroid abdrehen. Seine Dimensionen sind:

Querschnitt	q_1 =	0,4058 qcm (geometrisch gefunden)
„	q_2 =	0,4050 qcm (durch Wägung)
Mittelwert	q =	0,4054 qcm
Durchm. d. Leitkreises	=	9,977 cm
Umfang „ „	=	31,345 cm
Querschnittsdurchm.	=	0,718 cm
Spezifisches Gewicht	=	7,916

Der Querschnitt dieses Ringes ist mithin grösser als die der beiden vorigen Toroide. Der Stahl befand sich in weichem Zustande; der Ring war nämlich bis zur Rotglut erhitzt und dann allmählich in Holzkohlenstaub abgekühlt worden. Er bildet also in Bezug auf seine Härte ein Analogon zu dem ersten Ringe.

Zunächst wurde der Magnetisierungsprozess angestellt, um die magnetischen Faktoren zu bestimmen. Ein Solenoid von 480 Windungen diente als Sekundärspule, darüber lagerte ein Solenoid von 586 Primärwindungen. Ich lasse wiederum einige Zahlen aus dem Magnetisierungsversuch folgen: (siehe Tafel II)

H	B	μ	H	B	H	B
			Von			
1,0	107	103	338,1	18580	— 1,0	13630
11,5	5690	494	↓	↓	4,2	+13270
24,0	12730	530			11,0	Null
38,5	14350	372			11,4	— 1440
103,1	16350	159			23,9	13490
246,2	17960	73			245,0	18900
304,2	18390	60	↓	↓	302,6	19290
338,1	18580	55	bis Null	13720	336,2	19460

Das magnetische Verhalten bezüglich der Permeabilität zeigt für diesen Wolframstahl Ähnlichkeit mit dem des ersten Ringes. Allerdings nimmt H_C einen für Wolframstahl niedrigen Wert 11 C.-G.-S. an. Trotz der Weichheit des Materials beträgt die Retentionsfähigkeit nur 74%. Dem Grenzwert der Induktion 18580 C.-G.-S. würde als höchste Magnetisierung der Wert J = ca. 1450 entsprechen.

Nach völliger Entmagnetisierung wurde das Toroid mittels der Kreissäge geschlitzt; die Stirnflächen wurden glatt poliert. Der Schlitz hatte die Breite: 0,093 cm.

Hierauf wurde die Induktionskurve für den geschlitzten Ring aufgenommen. Die Koercitivintensität H_C behält ihren Wert 11 C.-G.-S. Die Remanenz hat auf 10040 C.-G.-S. abgenommen, so dass die Retentionsfähigkeit nur noch 52% beträgt. Die gleichzeitig gemessene Induktion im Schlitz für H = O, welche also die Anzahl der durch den Schlitz tretenden Kraftlinien darstellt, ist 1990 C.-G.-S.

Meine angefertigte Probespule hatte folgende Daten:
Innendurchmesser = 0,898 cm
3 Lagen à 5 Windungen aus 0,014 cm starkem Draht
= 15 Windungen Widerstand = 1,268 Ω
Spulenquerschnitt = 0,734 qcm
Breite der Spule = 0,137 cm.

Versuchsergebnisse:

B) Bestimmung der divergierenden Kraftlinien bei geöffnetem Ringe.

Der indifferente Punkt liegt etwas seitwärts, ca. 0,6 cm von der geometrischen Mitte entfernt. Beide Ringhälften stimmen wieder in ihren Endwerten überein.

linke Hälfte

Teilstrecke	Austretende Kraftlinien	In Prozenten
1) → 2)	60	1,4%
2) → 3)	123	2,9 „
3) → 4)	228	5,4 „
4) → 5)	340	8,1 „
5) → 6)	466	11,1 „
6) → 7)	640	15,2 „
7) → 8)	795	19,0 „
8) → 9)	1554	36,9 „
Summe:	4206	100,0%
1) → 5)	740	17,7%
5) → 9)	3440	82,3 „
Summe:	4180	100,0%
1) → 9)	4210	

Da diese Spule noch schmaler ist, stimmen die Gesamtwerte völlig überein. Es kann mithin der Unterschied

bei den früheren Versuchen in der Breite der verwendeten Spule seine Ursache haben. Die Verteilung der Streuung bietet zu einer besonderen Bemerkung keinen Anlass.

C) Bestimmung der beim zusammengedrückten Ringe austretenden Kraftlinien.

linke Hälfte

Teilstrecke	Austr. Kraftlinien	in Prozenten	Verschwindende Kraftlinien B — C	in Prozenten
1) → 2)	47	1,1 %	13	0,3 %
2) → 3)	90	2,1 „	33	0,8 „
3) → 4)	150	3,6 „	78	1,8 „
4) → 5)	228	5,4 „	112	2,7 „
5) → 6)	280	6,7 „	186	4,4 „
6) → 7)	290	6,9 „	350	8,3 „
7) → 8)	220	5,2 „	575	13,8 „
8) → 9)	115	2,7 „	1439	34,2 „
Summe:	1420	33,7 %	2786	66,3 %
1) → 5)	500	12,0 %	240	5,7 %
5) → 9)	890	21,3 „	2550	61,0 „
Summe:	1390	33,3 %	2790	66,7 %
1) → 9)	1420	33,7 %	2790	66,3 %

Die Streuung nimmt bei diesem Toroid ab in einer Stärke, wie sie die beiden anderen Ringe nicht erzielt haben. Es treten nur noch 33,7 % der Kraftlinien aus; zwei Drittel der ursprünglich divergierenden treten in das Innere des Magneten ein. Dieses günstige Resultat spricht für den guten magnetischen Schluss des Schlitzes. Die Anzahl der im Luftmedium verschwindenden Kraftlinien beträgt 2790 C.-G.-S.

D) Die Spule ist im Schlitz centriert.

Beim Zusammendrücken des Ringes treten in diesem Querschnitte an neuen Kraftlinien auf 2790 C.-G.-S. In diesem Falle ist die Übereinstimmung der beiden Werte B — C und D vollkommen:

$$B - C = 2790 \text{ C.-G.-S.}$$
$$D = 2790 \quad „$$

Um die Unabhängigkeit dieser Resultate vom Querschnitt der Spule, falls er denjenigen des Ringes nicht beträchtlich überragt, darzutun, stellte ich denselben Versuch mit einer Windung an, deren Querschnitt sich auf 0,876 qcm belief, also grösser war als der der Probespule. Ich fand

B)	1) → 9)	4180	1) → 5)	730
			5) → 9)	3440
			Summe:	4170
C)	1) → 9)	1390	1) → 5)	500
			5) → 9)	890
			Summe:	1390

Demnach $B - C = 2790$
$D = 2750$ C.-G.-S.
Also $B - C = D$ (Unterschied: 1,4%).

E) Bestimmung der im Spalt übertretenden Kraftlinien.

Die folgende Tabelle giebt für die einzelnen Windungen die zugehörigen Werte an:

Windungs-querschnitt	Kraftlinien-zahl pro qcm des Ringes	Kraftlinien-zahl pro qcm der Windung	Mittelwert	
0,522 qcm	2210	1720	1970	2000 C.-G.-S.
0,587 „	2360	1630	2000	
0,876 „	2790	1290	2040	

A)

Das Zusammendrücken des Toroids ergab für die ev. Veränderung der Kraftlinienzahl in der neutralen Zone den Wert = 0.

Resultat: $A = 0$ und $B - C = D$. Mithin dasselbe Ergebnis wie bei Ring 1 und 2.

Zu bemerken ist, dass die bei dem Magnetisierungsprozess gemessene Anzahl der im Luftspalt vorhandenen Kraftlinien 1990 C.-G.-S. übereinstimmt mit der jetzt noch vorhandenen Anzahl 2000 C.-G.-S. Die Kraftlinien im Schlitz haben ihren Wert konstant gehalten, während die Anzahl aller überhaupt vorhandenen Kraftlinien

$$4210 + 2000 = 6210 \text{ C.-G.-S.}$$

niedriger ist als der entsprechende Wert der remanenten Induktion 10040 C.-G.-S.

Streuungskoeffizient:

Für geöffneten Ring:

$$\nu_{offen} = \frac{K_{Ring}}{K_{Schlitz}}, \text{ wo } K_{Schlitz} = 2000 \text{ C.-G.-S.}$$

$\text{Max} = 6210 \qquad \text{Min} = 2000 \qquad l = 16{,}23 \text{ cm}$

Teilstrich 6): Es treten bis hierher laut B aus 1220, mithin beträgt der Kraftlinienstrom $6210 - 1220 = 4990$ C.-G.-S.

$$x_{berechnet} = \frac{16{,}23\,(4990 - 2000)}{6210 - 2000} = 11{,}52 \text{ cm}$$

$$x_{gemessen} = 10{,}35 \text{ cm}$$

Also $x_{berechnet} > x_{gemessen}$.

An dem um ca. 0,5 cm nach 7) zu liegenden Querschnitt ($x_{gemessen} = 10{,}88$ cm) ergiebt die Rechnung den wahrscheinlichen Mittelwert:

$$4990 - \frac{640 \cdot 0{,}53}{1{,}95} = 4820 \text{ C.-G.-S.}$$

Es ist $x_{berechnet} = \frac{16{,}23\,(4820 - 2000)}{4210} = 10{,}87$ cm

$$x_{gemessen} = 10{,}88 \text{ cm}$$

Also $x_{berechnet} = x_{gemessen}$.

Für den Streuungskoeffizienten des geöffneten Toroids ergiebt sich:

$$\nu_{\text{offen}} = \frac{4820}{2000} = \mathbf{2{,}41.}$$

Dieser Ring hat mithin von den drei untersuchten die kleinste Streuung im geöffneten Zustande.

Für zusammengedrückten Ring:

Max = 6210 Min = 2000 + 2790 = 4790 C.-G.-S.

Teilstrich 5): Der hier fliessende Kraftlinienstrom ist 6210 — 520 = 5690 C.-G.-S.

$$x_{\text{berechnet}} = \frac{16{,}23\,(5690 - 4790)}{6210 - 4790} = 10{,}29\text{ cm}$$

$$x_{\text{gemessen}} = 8{,}40\text{ cm}$$

Also $x_{\text{berechnet}} > x_{\text{gemessen}}$.

Um 0,7 cm weiter nach 6) zu gehend ($x_{\text{gemessen}} = 9{,}10$cm) finden wir den richtigen Mittelwert:

$$5690 - \frac{280 \cdot 0{,}7}{1{,}95} = 5590\text{ C.-G.-S.}$$

Es ist $x_{\text{berechnet}} = \frac{16{,}23\,(5590 - 4790)}{1420} = 9{,}14\text{ cm}$

Mithin $x_{\text{berechnet}} = x_{\text{gemessen}}$.

Der Streuungskoeffizient des zusammengedrückten Ringes wird also:

$$\nu_{\text{geschlossen}} = \frac{5590}{4790} = \mathbf{1{,}17.}$$

Die Streuung hat sich beim zusammengedrückten Ringe um die Hälfte gebessert und weicht von der Einheit nicht erheblich ab. Für diesen Ring ist mithin der beste magnetische Schluss erzielt worden.

Abschnitt 7.

Theoretische Betrachtungen.

Nachdem meine Hauptversuche bewiesen haben, dass für einen permanenten Magneten die Gesamtzahl aller vorhandenen Kraftlinien konstant ist, möchte ich im folgenden untersuchen, ob für einen permanenten Magneten überhaupt eine magnetomotorische Kraft existieren kann und ob sie mit dem Produkt aus der Koercitivkraft und der Länge des Magneten zu identifizieren ist.

Ich gehe von der begrifflichen Bestimmung der magnetomotorischen Kraft aus.

Bosanquet[1]) entwickelte 1883 die mathematische Analogie des Magnetismus mit der Elektricitätsleitung und führte zuerst den Begriff „magnetomotorische Kraft" ein, als eine im magnetischen Kreise wirkende Kraft, von der — wenn es sich um den inducierten Magnetismus handelt — der Kraftlinienstrom abhängt. Sie bildet das Analogon zur elektromotorischen Kraft des elektrischen Stromkreises und kann in entsprechender Weise definiert werden als diejenige Arbeit, die geleistet werden muss, um den magnetischen Einheitspol durch den ganzen magnetischen Kreis zu treiben. Die Intensität des magnetisierenden Feldes H ruft eine der Grösse und Richtung nach gleiche mechanische Kraft hervor, welche auf den Einheitspol in jedem Punkte seiner Bahn wirkt; da diese Kraft bei der Bewegung des Einheitspols überwunden werden muss, so wird die magnetomotorische Kraft als eine zu leistende Arbeit dargestellt durch das Linienintegral der magnetischen Intensität H längs des Kreises. Der Ausdruck:

$$\int H \cos \alpha \, dl$$

ist das Linienintegral der Feldintensität längs des Weges l, wenn α die Neigung des Wegelements dl gegen die Richtung von H bedeutet, und kann über beliebige Kurven, sowohl geschlossene als auch ungeschlossene magnetische

1) Bosanquet, Phil. Mag. 15, S. 205, 1883; und 19, S. 73. 1885.

Kreise, integriert werden. Beschränken wir uns auf einen vollkommenen magnetischen Kreis, so verläuft der Integrationsweg längs einer magnetischen Induktionslinie, die ihrerseits mit den Intensitätslinien H der Richtung nach übereinstimmt. Die Richtung des Integrationsweges ist also in allen Punkten dieselbe wie die der inducierenden Intensität, mithin

$$\cos \alpha = \cos 0^0 = 1,$$

das Linienintegral der Intensität geht über in $\int H\, dl$. Wenn nun noch die magnetisierende Intensität längs des Integrationsweges konstant ist, so stellt das Produkt „$H \cdot l$" die magnetomotorische Kraft für die Kurve l dar.

Das Linienintegral der Intensität H lässt sich unschwer berechnen für den Fall, dass der Integrationsweg eine geschlossene Kurve bildet; denn schneidet letztere die Fläche eines elektrischen Stromkreises von der Stromstärke i (C.-G.-S.) einmal, so ist die magnetomotorische Kraft für eine geschlossene Kurve $= 4\pi i$. Hat man aber auf dem zu integrierenden Wege eine solche Stromfläche n mal zu durchsetzen, beläuft sich der Wert obigen Linienintegrals auf $4\pi n i$. Drücken wir die Stromstärke i (C.-G.-S.) in Ampere aus, so erhalten wir als Resultat den bekannten Satz: Das Linienintegral der magnetischen Intensität H längs einer geschlossenen Kurve, d. i. die magnetomotorische Kraft, ist gleich $0{,}4\pi$ multipliziert mit der Anzahl der vom Integrationswege durchschnittenen Amperewindungen

$$= 0{,}4\pi n\, i_{\text{Amp.}}$$

Fliesst kein Strom durch den Leiter, trifft also der Integrationsweg keine von elektrischen Strömen umflossene Fläche, so nimmt das Linienintegral längs einer geschlossenen Kurve den Wert Null an; von einer magnetomotorischen Kraft ist mithin in diesem Falle nicht zu reden.

Koercitivkraft.

Bei einem magnetischen Kreisprozess tritt infolge der hysteretischen Erscheinungen die sogenannte Remanenz oder remanente Magnetisierung auf. Lässt man nämlich

nach der Magnetisierung die magnetische Feldintensität wieder bis auf den Wert Null abnehmen, so verschwindet als Folge des Zurückbleibens der Wirkung hinter der Ursache die Magnetisierung nicht, sondern behält einen beträchtlichen Wert bei, dessen numerische Grösse durch die Art des ferromagnetischen Stoffes und seine Gestalt bedingt wird. Dieser remanente Magnetismus wird jedoch nur sehr schwach festgehalten, denn ändert man die Richtung der Intensität H in die entgegengesetzte, so verschwindet die Magnetisierung schnell d. h. bei einer verhältnismässig geringen entgegengesetzten Feldintensität. Diese negative Intensität H bewirkt also, dass die remanente Magnetisierung auf den Wert Null herabgedrückt wird; sie genügt also, die Erscheinung der Remanenz zu zerstören. Die Grösse dieser negativen magnetisierenden Intensität kann man mithin nach Ewing[1]) als ein Mass für die Stabilität betrachten, mit der der remanente Magnetismus festgehalten wird, und nach J. Hopkinson's[2]) Beispiel ist dieser Grösse allgemein der Name Koercitivintensität beigelegt. Sie ist der mit der Reibung vergleichbare Widerstand, den nach der Weber'schen Molekulartheorie die Molekularmagnete der Drehung um ihre Schwerpunkte entgegensetzen. Bekanntlich wird die remanente Magnetisierung durch die Gestalt, nämlich durch das Vorhandensein von Enden des Ferromagnetikums erheblich beeinflusst in dem Sinne, dass die Remanenz eines endlosen Gebildes in ihrer Grösse grosse Einbusse erleidet durch die mit dem Auftreten der Enden verbundene selbstentmagnetisierende Intensität. Anders verhält sich dagegen die Koercitivintensität, die durch die bekannte Kurvenscherung keine Änderung erfährt; sie ist also von der Gestalt völlig unabhängig. Ein gesetzmässiger Zusammenhang zwischen den Grössen der remanenten Magnetisierung und der Koercitivintensität besteht also nicht. Wegen dieser Eigenschaft ihrer Unveränderlichkeit kann man auch die Koercitivintensität für einen vollständigen

1) Ewing, Magnetische Induktion, S. 53. 1892.
2) J. Hopkinson, Phil. Trans. 176, II, S. 465. 1885.

Kreisprozess als eine Materialkonstante ansehen, welche in gewissem Sinne eine erhöhte Stabilität der Magnetisierung mit sich bringt.

Aus der Definition für die magnetomotorische Kraft geht hervor: für den Fall der remanenten Magnetisierung ist die magnetisierende Intensität H gleich Null, mithin verschwindet auch die magnetomotorische Kraft, denn der Integrationsweg schneidet nur stromlose Windungen. Nun beruht ein permanenter Magnet in seiner Eigenschaft ausschliesslich auf der Existenz seiner magnetischen Remanenz, deren mehr oder weniger starke Konstanz den Grad der Permanenz bedingt. Nur wegen der remanenten Magnetisierung wird also ein Körper ein permanenter Magnet.

Es ist hiermit der Nachweis erbracht, dass nach der gegenwärtig geltenden Auffassung die von Busch vorausgesetzte magnetomotorische Kraft nicht vorhanden ist.

Auch die Koercitivintensität kann nach dem über sie Gesagten nicht als diejenige magnetisierende Intensität aufgefasst werden, die die remanente Magnetisierung als Wirkung zur Folge hat. Aus der Tatsache, dass eine negative Feldintensität nötig ist, um die Magnetisierung auf den Wert Null herabzudrücken, darf man nicht folgern, dass im Körper vorher eine positive Intensität von derselben Grösse wirkt, welche die Remanenz hervorruft. Beide stehen, wie ja schon erwähnt, in keiner eindeutigen Beziehung.

Es sei noch bemerkt, dass auch Ewing[1]) für einen solchen magnetischen Kreis, in dem es wohl remanente magnetische Induktionslinien giebt, den Wert Null für die magnetomotorische Kraft ansetzt.

---

1) Ewing, Magnetische Induktion, S. 246. 1892.

Abschnitt 8.

Näheres über die Magnetisierungen und Verlauf der Streuung bei wachsender Magnetisierung.

Die zur vorliegenden Arbeit notwendig gewesenen Magnetisierungen der Versuchstoroide sind an den betreffenden Stellen nur in ihrem Endergebnis mitgeteilt worden, und zwar soweit sie zur magnetischen Charakteristik der Wolframstahlsorten beitrugen. An dieser Stelle will ich diese angestellten Magnetisierungsversuche ausführlich behandeln, um einerseits ihre Methode und Anordnung erkennen zu lassen, andererseits um aus ihnen ein Nebenresultat noch zu ziehen. Letzteres bezieht sich auf den Verlauf der Streuung eines geschlitzten Toroids bei hochsteigender Magnetisierung, welche Verhältnisse H. Lehmann[1]) ausführlich untersucht hat. Auf Anregung dieser Arbeit hin stellte ich bei der Magnetisierung des radial geschlitzten Toroids gleichzeitig die jedesmal herrschende Magnetisierung für den Schlitz fest. Die Quotienten der magnetischen Induktion des Ferromagnetikums zu der im Schlitz auftretenden Induktion geben nämlich den charakteristischen Verlauf der Streuung des geschlitzten Ringes an.

Geschlossenes Toroid aus gehärtetem Wolframstahl.[2])

Nach Bestimmung der Dimensionen des Ringes (vergl. S. 32) wurden die Wickelungen hergestellt. Die Sekundärspule, die sich unmittelbar um das Toroid legte, bestand aus 1 Lage von 0,5 mm starkem, isoliertem Kupferdraht mit 465 Windungen. Darüber lagerten sich 3 Lagen 1 mm starken Kupferdrahtes mit insgesamt 504 Windungen, die zur Erzeugung des magnetischen Feldes dienten. Da ein starkes magnetisches Feld zwecks angenäherter Sättigung

1) H. Lehmann, Wied. Ann. 48, S. 406. 1893. Ein Auszug dieser Arbeit findet sich in: Du Bois, Magnetische Kreise, §§ 83—90.

2) Vergleiche dazu: Abschnitt 5, S. 31 u. ff.

der Magnetisierung erzielt werden sollte, mussten Ströme bis zu 15 Ampere die Primärspule durchfliessen. Die dabei auftretende, verhältnismässig grosse Erwärmung des Kupferdrahtes wurde beseitigt durch Anwendung eines Petroleumbades, dessen Temperatur durch Eiskühlung und Rührvorrichtung bis auf Schwankungen von wenigen Graden konstant gehalten wurde.[1]) Die Versuchsanordnung veranschaulicht Fig. 6 schematisch.

Um einen ev. direkten Einfluss des starken Primärstromes auf das Galvanometer unmöglich zu machen, war die Aufstellung der Apparate auf drei Zimmer verteilt, so dass die Primärleitung weit genug vom Galvanometer entfernt war. Die Primärleitung, welche durch eine Akkumulatorenbatterie gespeist wurde, setzt sich zusammen: aus einem Kommutator K_1, einem Präcisions-Amperemeter von Siemens & Halske und zwei Widerständen R_1 und R_2, deren letzterer aus Manganinblech bestehend für starke Ströme ohne Gefahr des Durchschmelzens zulässig war. In den Sekundärkreis waren im wesentlichen eingeschaltet ausser der Sekundärspule: ein Spiegelgalvanometer G, ein Erdinduktor E zur Aichung des ballistischen Galvanometers, ein Kommutator K_2 und zur Normierung der Ausschläge ein Ballastwiderstand R_3. Das hier benutzte Spiegelgalvanometer ist dasselbe Messinstrument, das zu meinen Hauptversuchen verwendet wurde, da es sich in beiden Fällen um die plötzliche Änderung der magnetischen Induktion handelt, welche in der Sekundärspule das Entstehen eines momentanen elektrischen Stromes verursacht. Dieses also durchweg benutzte

Galvanometer

war ein astatisches Galvanometer nach Thomson von Carpentier (Paris), das auf einer in die Wand eingelassenen Sandsteinplatte montiert war. Eine verhältnismässig hohe Empfindlichkeit dieses Galvanometers wird erzielt durch Verwendung von vier kreisrunden Multiplikatorrollen mit

1) Vergl. oben citierte Arbeit.

rechteckigem Windungsquerschnitt und einem dazwischen befindlichen astatischen System von zwei Magnetkomplexen. Die Centra der Rollen sind dabei dem Magnetsystem so nahe wie möglich herangebracht. Letzteres besteht aus zwei Magneten, die in einer Entfernung von ca. 8 cm auf einem Aluminiumstäbchen befestigt sind, in dessen Mitte ein kreisrunder Spiegel von 0,5 cm Durchmesser sitzt. Die Aufhängung des Systems ist durch einen 3 cm langen Quarzfaden bewirkt. Auf Rat des Herrn Prof. Dorn war das Galvanometer anlässlich früherer Versuche schon mit einem aus Transformatorblech hergestellten eisernen Cylinder eingehüllt worden, um gegen Einflüsse elektrischer und magnetischer Störungen von aussen nahezu geschützt zu sein. Die einfache Schwingungsdauer beträgt 7 sec.

Berechnung der magnetisierenden Kraft H:

Bekanntlich ist $H = 4\pi n\, i_{\text{absol. Mass}}$, wo n = Windungszahl pro cm der Spulenlänge.

Ist N die Gesamtwindungszahl und r der Radius des Spulenumfanges, so wird

$$n = \frac{N}{2\pi r}, \text{ mithin}$$

$$H = \frac{4\pi i N}{2\pi r} = \frac{2 i N}{r}.$$

Auch in diesem Falle, wo die Primärspule aus drei koncentrischen Lagen besteht, behält obige Beziehung ihre Anwendbarkeit. Denn wenn N_1, N_2, N_3 die Gesamtzahl der einzelnen Lagen bezeichnet, setzt sich das magnetische Feld zusammen:

$$H = \frac{2 i N_1}{r} + \frac{2 i N_2}{r} + \frac{2 i N_3}{r} = \frac{2 i}{r}(N_1 + N_2 + N_3)$$

$$H = \frac{2 i N}{r}.$$

Die besonderen Werte eingesetzt,

$$H = \frac{2 i 504}{4{,}959} = 203{,}25 \cdot i_{\text{absol.}}$$

$$\mathbf{H = 20{,}325 \cdot i_{\text{Ampere}}}$$

Berechnung der magnetischen Induktion B:

Für die jedesmalige Änderung der Induktion ΔB habe ich die eingangs meiner Hauptversuche (S. 20) abgeleitete Formel anzusetzen $\Delta B = \frac{\alpha \cdot w \cdot 2 \cdot F \cdot V}{\beta \cdot w' \cdot N \cdot q}$.

Die ganze, in irgend einem Stadium vorhandene magnetische Induktion wird durch die Summe aller vorangegangenen Ausschläge bestimmt, mithin

$$B = \Sigma\alpha \frac{w \cdot 2 \cdot F \cdot V}{\beta \cdot w' \cdot N \cdot q}$$

$F = 3{,}26 \cdot 10^4\ cm^2$ $\quad V = H \operatorname{tg} i = 0{,}193 \operatorname{tg} 65{,}8^0 = 0{,}429$

$N = 465$ $\quad q = 0{,}3939\ qcm.$

Durch Drehen des Erdinduktors erhielt ich bei einem Gesamtwiderstande $w'_1 = 156{,}4\ \Omega$ im Mittel den Ausschlag $\beta_1 = 78{,}2$ Scalenteile; bei einem Widerstande $w'_2 = 106{,}5\ \Omega$ den Ausschlag $\beta_2 = 115{,}4$ Sct. Folglich erhalte ich

$$B = 0{,}01247 \cdot w_\Omega \Sigma\alpha_{Sct.}$$

Der Gesamtwiderstand w des Sekundärkreises setzt sich zusammen aus dem Widerstande von Erdinduktor, Sekundärspule, Galvanometer, Zuleitung und Ballast $= 8{,}018\ \Omega +$ Ballast. Der Ballastwiderstand musste innerhalb einer Versuchsreihe wegen der ungleichartigen Grösse der Ausschläge variiert werden, wofern die Skala nicht aus dem Gesichtsfelde des Fernrohrs schreiten sollte. Der innerhalb einer Versuchsreihe gemeinsame Faktor in der Ausrechnung ist daher $\mathbf{B = 0{,}01247 \cdot w_\Omega \Sigma\alpha_{Sct.}}$

Es sei noch bemerkt, dass Ausschlag und Widerstand im C.-G.-S. = System nicht ausgedrückt zu werden brauchen, da diese Grössen je im Zähler und im Nenner vorkommen, es mithin nur auf ihr Verhältnis ankommt.

Im folgenden gebe ich eine Versuchsreihe über cyklische Magnetisierung des geschlossenen Toroids wieder mit Angabe der Beobachtungsdata. Die Kolumne: $\Sigma\alpha_{Sct.}$ giebt die Summe der Ausschläge bei ein und demselben Ballastwiderstand an, was bei der Ausrechnung der Induktion B zu berücksichtigen ist durch Summation dieser Endwerte:

$i_{Amp.}$	$\Sigma\alpha_{Sct.}$	Widerstand w	H	B	μ	$J = \frac{B - H}{4\pi}$
0,004	2,6		0,081	3,5	43	0,3
0,007	4,6		0,142	6,2	43	0,5
0,014	8,1		0,285	10,9	38	0,8
0,027	14,3	107,738 Ω	0,549	19,2	35	1,5
0,042	23,3		0,854	31,3	37	2,4
0,072	41,4		1,463	55,6	38	4,3
0,143	85,4		2,907	114	39	8,9
0,290	179,0		5,894	240	41	18,7
0,490	13,9		9,960	414	42	32,2
1,132	57,2		23,01	957	42	74,4
1,67	120,2	1005,218 Ω	33,94	1746	51	140
2,24	198,3		45,53	2725	60	213
2,68	292,8		54,47	3909	72	307
3,00	387,9		60,98	5101	84	401
3,38	78,6		68,70	7063	103	557
3,87	167,3		78,66	9278	118	732
4,54	235,6	2002,418 Ω	92,28	10983	119	867
5,50	285,4		111,8	12226	109	964
6,91	324,9		140,4	13212	94	1040
9,41	366,4		191,3	14248	74	1119
9,74	22,8		198,0	14364	73	1127
10,12	44,2		205,7	14472	70	1136
10,50	63,1		213,4	14568	68	1142
10,97	88,9		223,0	14695	66	1151
11,38	107,8	406,898 Ω	231,3	14795	64	1159
11,87	131,3		241,3	14914	62	1167
12,37	151,0		251,4	15014	60	1175
13,07	180,1		265,7	15162	57	1186
13,70	203,0		278,5	15278	55	1194
14,49	230,0		294,5	15415	52	1203
13,63	24,1		277,0	15293		
12,95	45,9		263,2	15183		
12,25	68,8	406,898 Ω	249,0	15066		
11,77	85,5		239,0	14982		
11,27	104,0		229,1	14888		
10,85	119,6		220,5	14809		

$i_{Amp.}$	$\Sigma \alpha_{Sct.}$	Widerstand w	H	B
10,36	143,1		210,6	14630
9,97	157,9		202,6	14614
9,60	173,2		195,1	14537
9,27	187,6		188,4	14464
6,83	307,1		138,8	13857
5,40	394,9		109,8	13412
4,50	459,9		91,46	13082
3,84	511,4		78,05	12821
3,36	552,5	406,898 Ω	68,29	12612
2,98	586,5		60,57	12440
2,67	616,6		54,27	12287
2,23	663,8		45,33	12048
1,66	729,0		33,74	11717
1,04	812,3		21,14	11294
0,485	894,2		9,858	10879
0,287	925,8		5,833	10718
0,143	949,0		2,907	10601
0,071	40,6		1,443	10547
0,040	56,9	107,738 Ω	0,813	10525
0,026	62,7		0,529	10517
0,014	11,7		0,285	10510
0,007	16,2	47,906 Ω	0,142	10508
0,004	18,2		0,081	10506
Null	21,1		Null	10505

Kommutation der Stromrichtung.

0,004	2,6		— 0,081	10503
0,007	5,0	47,906 Ω	0,142	10502
0,014	11,4		0,285	10498
0,026	24,0		0,529	10490
0,040	6,6		0,813	10481
0,070	23,4	107,738 Ω	1,423	10459
0,143	69,3		2,907	10397
0,287	28,4		5,833	10253
0,488	70,8	406,898	9,919	10038

$i_{Amp.}$	$\Sigma\, \alpha_{Sct.}$	Widerstand W	H	B
1,029	53,5	1005,218	20,92	9367
1,67	137,2		33,94	8319
2,23	56,1	2002,418	45,33	6919
2,69	136,3		54,68	4916
3,00	227,7		60,98	+ 1511
3,38	135,7	3996,818	68,70	— 5251
3,87	54,1	5991,218	78,66	9292
4,54	75,7		92,28	10905
5,50	91,6		111,8	12093
6,93	18,7	3996,818	140,9	13025
9,42	38,2		191,5	13996
9,74	19,7	406,898 Ω	198,0	14096
10,10	41,1		205,3	14205
10,48	61,0		213,0	14306
10,98	85,3		223,2	14429
11,40	103,9		231,7	14523
11,94	125,7		242,7	14634
12,44	146,6		252,8	14740
13,14	174,9		267,1	14883
13,80	198,9		280,5	15005
14,58	226,4		296,3	15145
13,69	25,6	406,898 Ω	278,3	15015
12,99	45,7		264,0	14913
12,31	68,0		250,2	14800
11,81	86,4		240,0	14707
11,30	104,1		229,7	14617
10,88	120,1		221,1	14536
10,39	137,8		211,2	14446
10,00	151,8		203,3	14375
9,64	166,5		195,9	14300
9,30	181,1		189,0	14226
6,85	301,6		139,2	13615
5,43	387,7		110,4	13178
4,50	454,5		91,46	12839

$i_{Amp.}$	$\Sigma a_{Sct.}$	Widerstand w	H	B
3,84	505,5		78,05	12581
3,37	546,5		68,50	12373
2,98	581,7		60,57	12194
2,67	610,1		54,27	12050
2,23	655,3	406,898 Ω	45,33	11821
1,66	748,7		33,74	11347
1,04	804,2		21,14	11065
0,485	881,5		9,858	10673
0,286	911,4		5,813	10521
0,142	933,6		2,886	10409
0,070	40,9		1,423	10354
0,040	56,6	107,738 Ω	0,813	10333
0,026	64,0		0,529	10323
0,014	12,3		0,285	10316
0,007	18,8	47,906 Ω	0,142	10312
0,004	21,3		0,081	10310
Null	25,4		Null	10308
		Kommutation der Stromrichtung		
0,004	2,7		+0,081	10306
0,007	5,4	47,906 Ω	0,142	10305
0,014	12,0		0,284	10301
0,026	23,9		0,529	10294
0,040	6,1		0,813	10286
0,070	22,9	107,738 Ω	1,423	10263
0,143	67,6		2,907	10203
0,287	25,1	406,898 Ω	5,833	10076
0,488	65,7		9,919	9870
1,027	52,9	1005,818 Ω	20,87	9207
1,67	132,9		33,94	8204
2,24	27,2		45,53	6849
2,68	65,5	3996,818 Ω	54,47	4940
3,00	130,1		60,98	—1721

$i_{Amp.}$	$\Sigma \alpha_{Sct.}$	Widerstand w	H	B
3,38	96,8	5991,218 Ω	68,70	+5509
3,87	151,4		78,66	9589
4,53	173,3		92,07	11219
5,50	187,8		111,8	12309
6,93	19,0	8996,818 Ω	140,9	13256
9,38	39,3		190,7	14267
9,70	18,9	406,898 Ω	197,2	14363
10,07	40,3		204,7	14471
10,45	58,9		212,4	14566
10,94	83,4		222,4	14690
11,35	102,8		230,7	14789
11,84	123,8		240,7	14895
12,31	143,5		250,2	14995
13,00	171,1		264,2	15135
13,63	195,0		277,0	15256
14,40	222,4		292,7	15395

Die hiernach gezeichnete magnetische Induktionskurve $B = f(H)$ befindet sich auf der am Ende beigefügten Figurentafel I, und zwar ist sie strich-punktiert gezeichnet.

Radial geschlitztes Toroid.

Nach völliger Entmagnetisierung wurde der Ring in früher erwähnter Weise (S. 33) geschlitzt. Die Breite des Schlitzes betrug $d = 0{,}121$ cm. Die Herstellung der Wickelungen erforderte grosse Sorgfalt. Der Luftraum des Schlitzes wurde durch eine magnetisch indifferente Messingscheibe von gleicher Dicke des Schlitzes und gleichem Querschnitt des Ringes ausgefüllt. Eine aufgetragene Schellacklösung hielt es in centrierter Lage fest. Beim Wickeln der Sekundärspule musste beachtet werden, dass ihre Windungen, 450 an der Zahl, nur bis an die Stirnflächen des Schlitzes reichten, der Schlitz selber also frei

blieb. Über das Messingscheibchen legte ich unter Benutzung einer Lupe 4 Windungen von 0,014 cm starkem Kupferdraht. Die Enden und Windungen dieser beiden Sekundärspulen wurden fixiert durch eine aufgetragene Mischung von flüssigem Kollophonium und Wachs, welche gleichzeitig auch die Lücken zwischen den einzelnen Windungen ausfüllte. Über diese glatte Oberfläche wurden die drei Lagen der Primärspule mit 506 Windungen gelegt, wobei grösste Vorsicht zu walten hatte, damit die dünnen Enden der kleinen Sekundärspule durch Berühren nicht abgebrochen wurden.

Die Primärspule erstreckte sich somit über den ganzen Ring, auch über den Spalt, so dass ein gleichförmiges magnetisches Feld längs des ganzen Umfangs des Kreises geschaffen wurde. Mittels der aus 450 Windungen bestehenden Sekundärspule wurde die magnetische Induktion im Ferromagnetikum $B_{(Ring)}$ gemessen, mit der 4 Windungen zählenden Spule die zugehörige Induktion im Interferrikum $B_{(Schlitz)}$ bestimmt.

Nach der S. 27 gegebenen Erklärung ist der Streuungskoeffizient bestimmt durch das Verhältnis des Mittelwertes des ferromagnetischen Induktionsflusses zu dem im Schlitz herrschenden, also

$$\nu = \frac{G_{(Ring)}}{G_{(Schlitz)}}$$ oder da Ring und Schlitz denselben Querschnitt besitzen

$$\nu = \frac{B_{(Ring)} \cdot q}{B_{(Schlitz)} \cdot q} = \frac{B_{(Ring)}}{B_{(Schlitz)}}.$$

Die Versuchsanordnung war wie beim geschlossenen Ringe, nur dass zur gleichzeitigen Beobachtung der Induktion im Schlitze noch eine zweite Sekundärleitung nötig war. Sie bestand analog aus einem Widerstandskasten, dem Erdinduktor, Kommutator und einem Spiegelgalvanometer, nämlich einem Panzergalvanometer von Siemens & Halske (Schwingungsdauer 7 sec).

Die magnetisierende Kraft ist gleich:

$$H = \frac{2\,i\,N}{r} = \frac{2.506}{4{,}959}\, i_{absol} = 204{,}06 \cdot i_{absol.}$$

$$\mathbf{H = 20{,}406 \cdot i_{Amp.}}$$

Für die magnetische Induktion $B_{(Ring)}$ habe ich die Beziehung:

$$B_{(Ring)} = \Sigma\,\alpha \cdot w \frac{2\,F \cdot V}{w' \cdot \beta \cdot q \cdot N}, \text{ wo } N = 450.$$

Erdinduktorausschläge erhielt ich:

$\beta_1 = 112{,}9$ Sct. bei $w_1' = 108{,}0\ \Omega$
$\beta_2 = 77{,}6$ „ „ $w_2' = 157{,}8\ \Omega$.

Mithin:

$$\mathbf{B_{(Ring)} = 0{,}01293 \cdot w_\Omega \cdot \Sigma\,\alpha_{Sct.}}, \text{ wo } w = 8{,}249\,\Omega + \text{Ballast.}$$

Die magnetische Induktion $B_{(Schlitz)}$ berechnet sich analog:

$$B_{(Schlitz)} = \Sigma\,\alpha \cdot w \frac{2\,F \cdot V}{w' \cdot \beta \cdot q \cdot N}, \text{ wo } N = 4 \text{ ist.}$$

Erdinduktorausschläge waren:

$\beta_1 = 87{,}6$ Sct. bei $w_1' = 613{,}8\ \Omega$
$\beta_2 = 75{,}3$ „ „ $w_2' = 713{,}8\ \Omega$.

Also:

$$\mathbf{B_{(Schlitz)} = 0{,}33059 \cdot w_\Omega \cdot \Sigma\,\alpha_{Set.}}, \text{ wo } w = 13{,}185\,\Omega + \text{Ballast.}$$

Die Beobachtungsdata für die aufsteigende Induktionskurve enthält die folgende Tabelle.[1])

---

1) Von Hysteresis für die Streuungsverhältnisse wurde wie auch in der Lehmann'schen Arbeit abgesehen. Über die Gründe lies Lehmann, Wied. Annal. 48.

$i_{Amp.}$	Ring		Schlitz	
	$\Sigma\, \alpha_{Sct.}$	Widerstand	$\Sigma\, \alpha_{Sct.}$	Widerstand
0,017	11,5	107,969 Ω	1,0	
0,043	24,0		3,2	
0,073	40,2		5,2	
0,145	79,6		9,2	
0,289	159,9		17,2	
0,487	12,1	1005,449 Ω	28,2	13,185 Ω
1,024	51,7		62,5	
1,66	106,5		107,5	
2,23	169,9		156,0	
2,67	241,0		203,0	
2,97	305,4		242,2	
3,35	52,2	2002,649 Ω	304,7	
3,83	121,1		391,7	
4,48	199,6		503,4	
5,40	264,9		628,9	
6,81	320,1		85,5	23,185 Ω
9,23	372,0		189,5	
10,26	77,5	407,129 Ω	27,3	33,185 Ω
11,13	130,8		27,8	
11,72	157,8		42,7	23,185 Ω
12,10	180,5		22,4	
12,73	210,8		52,9	13,185 Ω
13,35	238,2		82,4	
14,04	267,0		112,4	

Diese Beobachtungszahlen verwerte ich nun zur Ausrechnung von H, $B_{(Ring)}$ und $B_{(Schlitz)}$. Es sei vorausgeschickt, dass die gefundenen Werte für H dem von der Primärspule erzeugten magnetischen Felde entsprechen. Die aber im Innern des Ferromagnetikums tatsächlich herrschende magnetische Kraft ist durch das Auftreten der selbstentmagnetisierenden Intensität eine kleinere Grösse geworden. Aus der Induktionskurve für geschlossenen Ring entnehme ich

die zu jeder Induktion gehörende, totale magnetisierende Intensität.

$H_{(Spule)}$	$B_{(Ring)}$	$B_{(Schlitz)}$	ν	H_{total}	J	μ
0,35	16,1	4,4	3,66	0,35	1,2	
0,88	33,5	14,0	2,39	0,88	2,6	
1,49	56,1	22,7	2,47	1,48	4,3	
2,96	111	40,1	2,77	2,82	8,6	
5,90	223	75,0	2,98	5,49	17,3	
9,94	381	123	3,10	9,15	29,5	
20,90	895	272	3,29	20,00	69,5	
33,87	1608	469	3,43	32,00	125	
45,51	2432	680	3,58	42,0	190	
54,48	3356	885	3,79	50,3	263	
60,61	4193	1056	3,97	56,0	329	
68,36	5545	1328	4,18	62,7	436	88
78,16	7329	1707	4,29	69,9	578	105
91,42	9361	2194	4,27	79,4	739	118
110,2	11052	2741	4,03	93,4	872	118
139,0	12482	3396	3,68	119,2	984	105
188,3	13825	4193	3,30	170,5	1087	81
209,4	14233	4493	3,17	190,6	1117	75
227,1	14514	4706	3,08	209,0	1138	69
239,2	14656	4820	3,04	220,0	1149	67
246,9	14775	4918	3,00	229,6	1157	64
259,8	14935	5051	2,96	243,3	1169	61
272,4	15079	5179	2,91	257,7	1179	59
286,5	15230	5310	2,87	273,2	1190	56

Hieraus geht hervor: Der Streuungskoeffizient ν wächst erheblich bei aufsteigender Magnetisierung bis zu ungefähr J = 600 C.-G.-S., um darauf abzunehmen, wenn die Magnetisierung gesteigert wird. Da der zu dem Maximalwert der Streuung zugehörige Wert für J die Hälfte des Maximums J = 1200 C.-G.-S. beträgt, so kann für den Fall der praktischen Sättigung des Wolframstahls = ca. 1700 C.-G.-S. gefolgert werden, dass die Streuung bis zur halben Sättigung bedeutend wächst und dann abnimmt.

H. Lehmann hat in seiner Arbeit dagegen gefunden, dass der experimentell gemessene Streuungskoeffizient bis zur halben Sättigung constant bleibt und dann bei gesteigerter Magnetisierung abnimmt.

Zur Erhärtung der Richtigkeit meines Resultates stellte ich an meinem dritten Ringe dieselben Versuchsreihen an. Da in Bezug auf die Versuchsanordnung dieselben Verhältnisse obwalten, begnüge ich mich mit der Wiedergabe des Endresultates:

Magnetisierungskurve des geschlitzten Toroids aus Wolframstahl Marke W. J. G.

$H_{(Spule)}$	$B_{(Ring)}$	$B_{(Schlitz)}$	ν	J
0,44	34,7	10,2	3,41	
1,11	96,5	29,9	3,23	
2,06	195,9	56,0	3,50	
4,69	587	145	4,05	46
12,89	3312	808	4,10	263
26,91	10589	2487	4,26	841
43,27	13807	3565	3,87	1095
53,19	15346	4320	3,55	
85,82	16350	4970	3,29	
114,6	17178	5578	3,08	
137,8	17640	5985	2,95	
175,0	18285	6512	2,81	
238,1	19058	7229	2,64	
264,5	19330	7485	2,58	
285,5	19532	7675	2,54	
297,4	19638	7774	2,53	
309,9	19738	7879	2,51	
324,7	19837	7986	2,48	
339,2	19941	8100	2,46	
357,1	20051	8227	2,44	1570

Der Streuungskoeffizient wächst ebenfalls erheblich bis zu einem Maximum, das für einen Wert $263 < J < 841$ er-

reicht wird und zwar liegt dieser Wert näher an J = 840. Er wird nahezu an 800 C.-G.-S. heranreichen und somit die Hälfte des Maximalwertes der Magnetisierung ca. 1600 C.-G.-S. darstellen.

Die Streuung ist also keineswegs bis zur halben Sättigung konstant. Vielmehr wächst der gemessene Streuungskoefficient bis zur halben Sättigung bedeutend und nimmt dann bei gesteigerter Magnetisierung ab.

Das Hauptresultat der vorliegenden Arbeit lässt sich kurz in den Satz zusammenfassen:

Für einen permanenten Magneten ist die Gesamtanzahl der vorhandenen Kraftlinien jederzeit unveränderlich. Er ist daher als Sitz einer konstanten Kraftlinienzahl zu betrachten.

Zum Schlusse sei es mir gestattet, meinem hochverehrten Lehrer, Herrn Professor Dr. Dorn für die freundliche Anregung zu dieser Arbeit und die gütige Unterstützung meinen herzlichsten Dank auszusprechen.

Ebenso sage ich an dieser Stelle Herren cand. math. Jul. Bloedorn und stud. chem. Joh. Hirsch Freundesdank für die stete Hilfe, welche sie mir in uneigennütziger Bereitwilligkeit bei meinen langwierigen Versuchen geleistet haben.

Lebenslauf.

Ich, Hermann Eichel, evangelischer Konfession, wurde am 14. Juni 1880 als Sohn des Kaufmanns Heinrich Eichel und seiner Ehefrau Emma, geb. Lüdtke, zu Stettin geboren. Von Ostern 1890 ab besuchte ich zu Stettin das Schiller-Realgymnasium, welches ich Ostern 1899 mit dem Zeugnis der Reife verliess. Seitdem habe ich mich in Halle dem Studium der Mathematik und Naturwissenschaften gewidmet.

Meine Lehrer waren die Herren:

Cantor, Dorn, Eberhardt, Fries, Grassmann, Grenacher, Haym, Kirchhoff, Klebs, Lorenz, Neumann, Riehl, Vaihinger, Wangerin.

Allen diesen meinen verehrten Lehrern, besonders aber Herrn Prof. Dr. Dorn, sage ich meinen aufrichtigen Dank.

LIBRARY OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA

Fig.1.

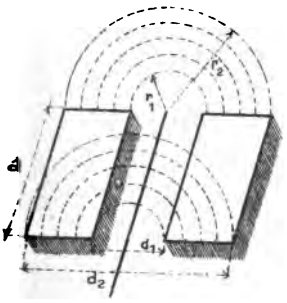


Fig.3.

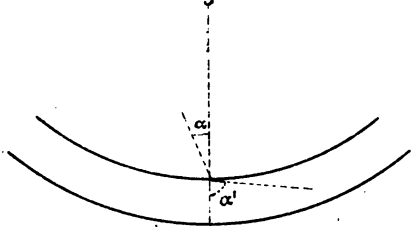


Fig.2.

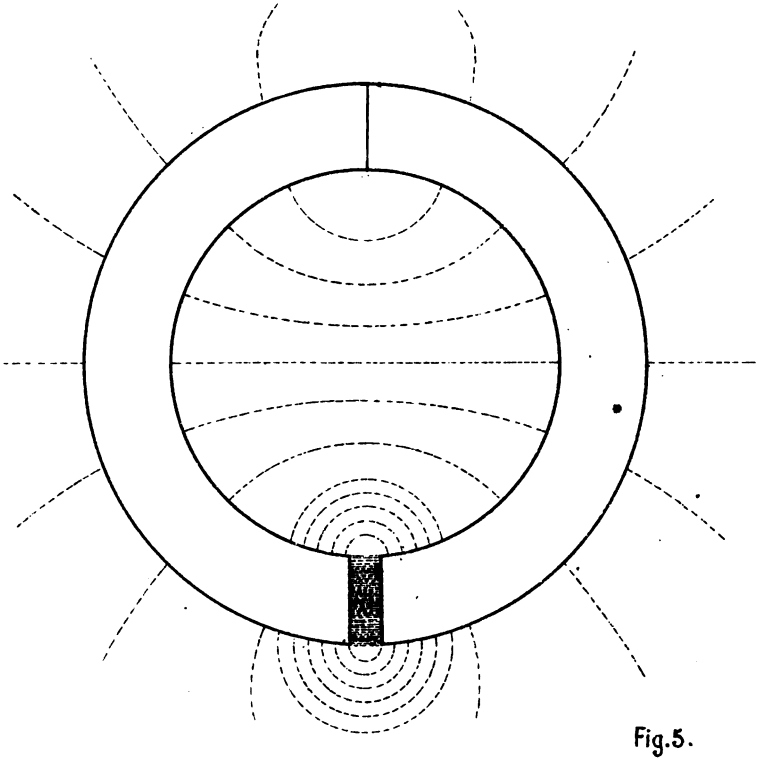


Fig.5.

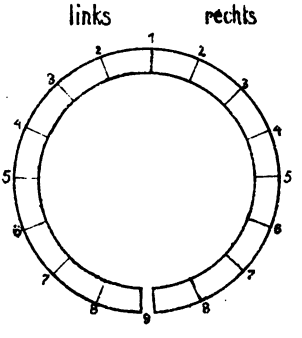


Fig.4.

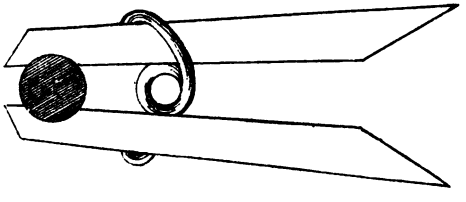


Fig.1.

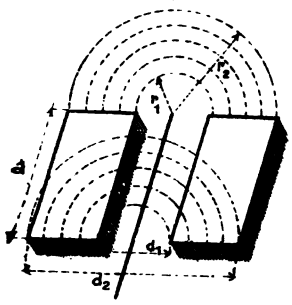


Fig3.

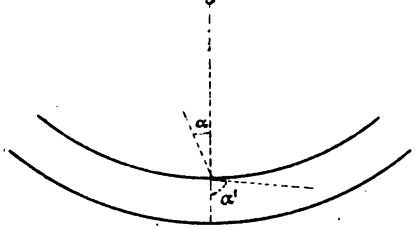


Fig.2.

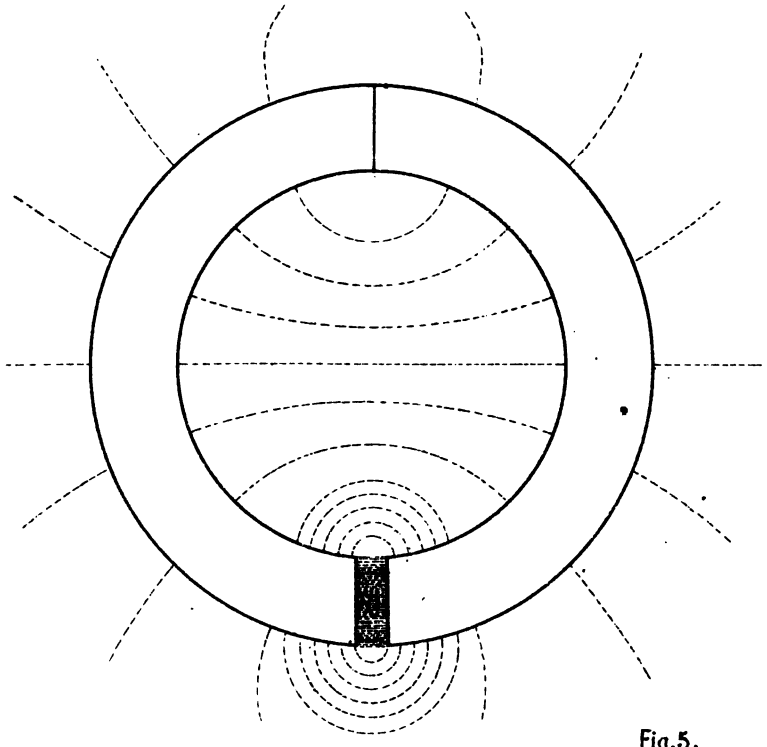


Fig.5.

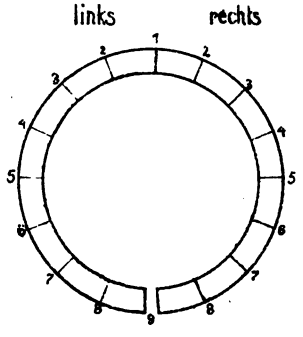
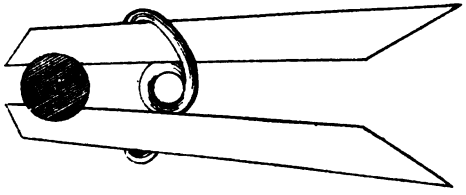
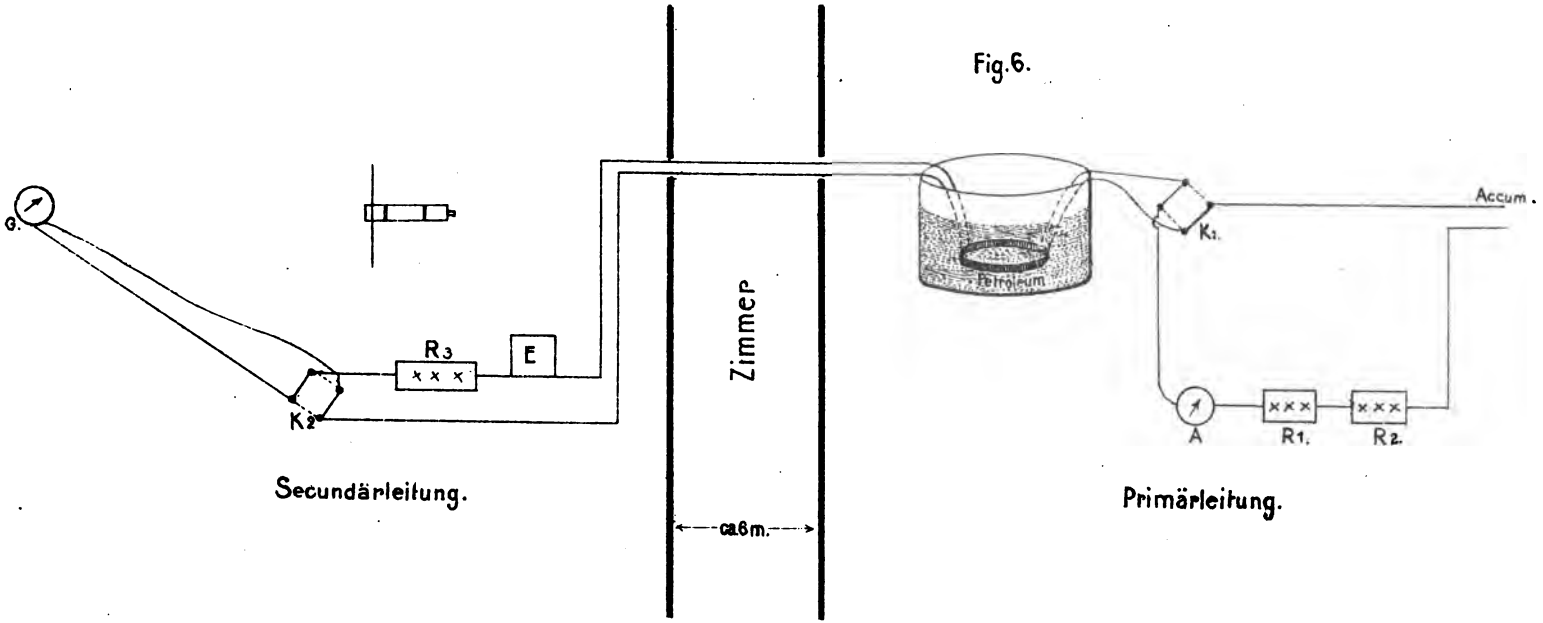


Fig.4.



LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY
OF
CALIFORNIA

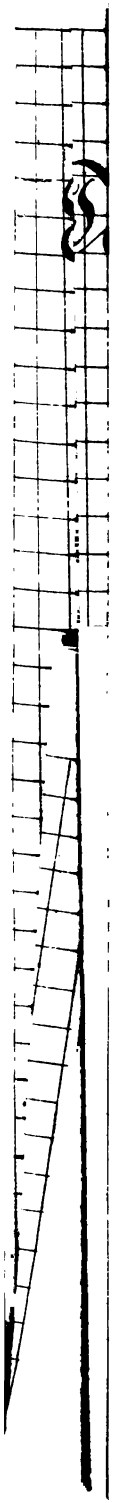
Fig.6.



Secundärleitung.

Primärleitung.

LIBRARY
THE



LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY
OF
CALIFORNIA

YC 10782